



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Estudio del Comportamiento Dinámico de un
Vehículo Ferroviario Equipado con Suspensión
Secundaria Semiactiva Utilizando Lógica Difusa**

**PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA**

Autor: D. JUAN JURADO ZURRO

Tutora: Dra. Dña. MARÍA JESÚS LÓPEZ BOADA

2010

A mi familia y amigos

ÍNDICE

1.-INTRODUCCIÓN

1.1-OBJETIVOS

1.2-ESTRUCTURA DEL PROYECTO

2.-SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.1-DEFINICIÓN Y FUNCIONES DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN

2.2-ELEMENTOS DE SUSPENSIÓN

2.2.1-RESORTES HELICOIDALES

2.2.2-BARRAS DE TORSIÓN

2.2.3-BALLESTAS

2.2.4-RESORTES DE CAUCHO-METAL

2.2.5-RESORTES NEUMÁTICOS

2.2.6-AMORTIGUADORES

2.3-SUSPENSIONES EN VEHÍCULOS FERROVIARIOS

2.3.1-BOGIE

2.3.2-SUSPENSIÓN PRIMARIA

2.3.3-SUSPENSIÓN SECUNDARIA

2.4-TIPOS DE SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.4.1-SISTEMA DE SUSPENSIÓN PASIVA

2.4.2-SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA

2.4.3-SISTEMA DE SUSPENSIÓN SEMIACTIVA

3.-CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

3.1- INTRODUCCIÓN

3.2-CONJUNTOS DIFUSOS

3.3-OPERACIONES BÁSICAS CON CONJUNTOS

3.4-FUNCIONAMIENTO DE LA LÓGICA DIFUSA

3.5-CONTROLADORES BORROSOS

3.6-VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA LÓGICA BORROSA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN VEHÍCULO
FERROVIARIO EQUIPADO CON SUSPENSIÓN SECUNDARIA
SEMIACTIVA UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA

4.-MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

4.1-MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD

4.2-MODELO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD. EL CUARTO DE BOGIE

4.3-MODELO DE BOGIE DE TRES GRADOS DE LIBERTAD

4.4-SISTEMA DE CUATRO GRADOS DE LIBERTAD. EL MODELO DE MEDIO BOGIE

4.5-EL MODELO DE BOGIE ENTERO

5.-RESULTADOS DE SIMULACIÓN

5.1-MODELADO DEL VEHÍCULO FERROVIARIO

5.1.1-IRREGULARIDADES DE LA VÍA

5.1.1.1-IRREGULARIDADES PERIÓDICAS

5.1.1.2-IRREGULARIDADES ALEATORIAS

5.1.2-ACELERACIÓN DE LOS PASAJEROS

5.1.3-PARÁMETROS DEL VEHÍCULO FERROVIARIO

5.2-CONDICIONES DE LA SIMULACIÓN

5.3-RESULTADOS DE SIMULACIÓN

5.3.1-RESULTADOS PARA MODELO QUE CIRCULA POR UNA VÍA CON UN PERFIL DE IRREGULARIDADES PERIÓDICAS

5.3.3-RESULTADOS PARA MODELO QUE CIRCULA POR UNA VÍA CON UN PERFIL DE IRREGULARIDADES ALEATORIAS

6.-CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1-CONCLUSIONES

6.2-TRABAJOS FUTUROS

7.-ANEXO

8.-REFERENCIAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Resorte helicoidal

Figura 2.2 – Barra de torsión

Figura 2.3 – Ballesta

Figura 2.4 – Montaje de ballestas en bogie

Figura 2.5 – Resorte de caucho-metal

Figura 2.6 – Resorte neumático en bogie

Figura 2.7 – Amortiguador en bogie

Figura 2.8 – Bogie europeo Y-25.

Figura 2.9 – Amortiguador de doble tubo

Figura 2.10 – Amortiguador monotubo

Figura 2.11 – Bogie

Figura 2.12 – Montajes de suspensión primaria en bogies

Figura 2.13 – Suspensión primaria en bogie de unidad de metro

Figura 2.14 – Detalle de articulación entre largueros principales del bogie

Figura 2.15 – Montaje de sistema de suspensión

Figura 2.16 – Modificación de las propiedades de un fluido magnetorreológico al aplicarle un campo magnético H

Figura 3.1 – Esquema de distintas teorías lógicas

Figura 3.2 – Clasificación de las teorías lógicas

Figura 3.3 – Funciones más utilizadas en lógica difusa

Figura 3.4 – Ejemplo de variable lingüística: Edad

Figura 3.5 – Ejemplo. Gráfica de la función de pertenencia: x no es joven

Figura 3.6 – Ejemplo. Gráfica de la función de pertenencia: x es un niño o un joven

Figura 3.7 – Ejemplo: Gráfica de la función de pertenencia: x es un niño y un joven

Figura 3.8 – Esquema de control borroso

Figura 3.9 – Términos lingüísticos

- Figura 4.1 – Modelo simplificado de un vehículo de bogies
- Figura 4.2 – El modelo de una masa. Eje montado y vía
- Figura 4.3 – El modelo de dos masas. Eje y bogie
- Figura 4.4 – El modelo de tres masas. Eje, bogie y caja del vehículo
- Figura 4.5 – El modelo de medio bogie
- Figura 4.6 – El modelo de vehículo completo
- Figura 5.1 – Modelo de vehículo con nueve grados de libertad
- Figura 5.2 – Perfil de la vía con irregularidades periódicas
- Figura 5.3 – Perfil del raíl derecho de la vía con irregularidades periódicas
- Figura 5.4 – Perfil del raíl izquierdo de la vía con irregularidades periódicas
- Figura 5.5 – Modelo de vehículo con suspensión pasiva para vía con irregularidades periódicas
- Figura 5.6 – Modelo de vehículo con suspensión pasiva para vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.7 – Detalle del sistema de control en el modelo
- Figura 5.8 – Modelo de vehículo con suspensión gobernada por controlador para vía con irregularidades periódicas
- Figura 5.9 – Modelo de vehículo con suspensión gobernada por controlador para vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.10 – Esquema del controlador borroso en *Simulink*
- Figura 5.11 – Estructura de la variable de entrada “aceleración” para el modelo con irregularidades periódicas en *Simulink*
- Figura 5.12 – Estructura de la variable de entrada “aceleración” para el modelo con irregularidades aleatorias en *Simulink*
- Figura 5.13 – Estructura de la variable de entrada “velocidad” para el modelo en *Simulink*
- Figura 5.14 – Estructura de la variable de entrada “desplazamiento” para el modelo en *Simulink*
- Figura 5.15 – Estructura de la variable de salida “fuerza” para el modelo en *Simulink*

Figura 5.16 – Aceleración \ddot{z}_c para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.17 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_c para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.18 – Aceleración $\ddot{\varphi}_c$ para perfil de la vía con irregularidades

Figura 5.19 – Respuesta en frecuencia de la aceleración $\ddot{\varphi}_c$ para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.20 – Aceleración $\ddot{\theta}_c$ para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.21 – Aceleración \ddot{z}_{fr} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.22 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{fr} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.23 – Aceleración \ddot{z}_{fl} para perfil de la vía con irregularidades

Figura 5.24 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{fl} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.25 – Aceleración \ddot{z}_{rr} para perfil de la vía con irregularidades

Figura 5.26 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{rr} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.27 – Aceleración \ddot{z}_{rl} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.28 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{rl} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.29 – Desplazamiento del asiento delantero derecho para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.30 – Desplazamiento del asiento delantero izquierdo para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.31 – Desplazamiento del asiento trasero derecho para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.32 – Desplazamiento del asiento trasero izquierdo para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Figura 5.33 – Aceleración \ddot{z}_c para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

Figura 5.34 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_c para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

- Figura 5.35 – Aceleración $\ddot{\varphi}_c$ para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.36 – Respuesta en frecuencia de la aceleración $\ddot{\varphi}_c$ para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.37 – Aceleración $\ddot{\theta}_c$ para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.38 – Respuesta en frecuencia de la aceleración $\ddot{\theta}_c$ para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.39 – Aceleración \ddot{z}_{fr} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.40 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{fr} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.41 – Aceleración \ddot{z}_{fl} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.42 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{fl} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.43 – Aceleración \ddot{z}_{rr} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.44 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{rr} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.45 – Aceleración \ddot{z}_{rl} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.46 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{rl} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.47 – Desplazamiento del asiento delantero derecho para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.48 – Desplazamiento del asiento delantero izquierdo para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.49 – Desplazamiento del asiento trasero derecho para perfil de la vía con irregularidades aleatorias
- Figura 5.50 – Desplazamiento del asiento trasero izquierdo para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1- Parámetros del vehículo ferroviario

Tabla 5.2- Términos lingüísticos utilizados por el controlador

Tabla 5.3- Valores de la aceleración RMS para perfil de vía periódico

Tabla 5.4- Valores de la aceleración RMS para perfil de vía aleatorio

Tabla 8.1- Primer conjunto de reglas para el controlador

Tabla 8.2- Segundo conjunto de reglas para el controlador

NOMENCLATURA

En este apartado se muestran los términos que aparecen en todas las ecuaciones de este proyecto y su significado [1].

“s”: suspensión secundaria.

“p”: suspensión primaria.

“x”/“y”/“z”: direcciones de las suspensiones y de las fuerzas de amortiguamiento.

“l”: bogie principal.

“t”: bogie secundario o “rastreador”.

“1”/“2”/“3”/“4”: número del eje.

“1”: primer eje del bogie derecho.

“2”: segundo eje del bogie derecho.

“3”: primer eje del bogie izquierdo.

“4”: segundo eje del bogie izquierdo.

“r”: partes localizadas en el lado derecho.

“l”: partes localizadas en el lado izquierdo.

VEHÍCULO

m_c : masa del cuerpo del vehículo.

I_{cx} : momento de inercia de balanceo del cuerpo del vehículo.

I_{cy} : momento de inercia de cabeceo del cuerpo del vehículo.

I_{cz} : momento de inercia de guiñado del cuerpo del vehículo.

m_t : masa del bogie.

I_{tx} : momento de inercia de balanceo del cuerpo del bogie.

I_{ty} : momento de inercia de cabeceo del cuerpo del bogie.

I_{tz} : momento de inercia de guiñado del cuerpo del bogie.

k_{px} : coeficiente de rigidez primaria longitudinal.

k_{py} : coeficiente de rigidez primaria lateral.

k_{pz} : coeficiente de rigidez primaria vertical.

c_{px} : coeficiente de amortiguamiento longitudinal primario.

c_{py} : coeficiente de amortiguamiento lateral primario.

c_{pz} : coeficiente de amortiguamiento vertical primario.

k_{sx} : coeficiente de rigidez secundaria longitudinal.

k_{sy} : coeficiente de rigidez secundaria lateral.

k_{sz} : coeficiente de rigidez secundaria vertical.

c_{sx} : coeficiente de amortiguamiento longitudinal secundario.

c_{sy} : coeficiente de amortiguamiento lateral secundario.

c_{sz} : coeficiente de amortiguamiento vertical secundario.

l : distancia del centro de gravedad del vehículo a cualquiera de los bogues.

b : distancia del centro de gravedad del bogie a cualquiera de los ejes de dicho bogie.

d_p : distancia del centro de gravedad del bogie a la suspensión primaria (lateral).

a : distancia del centro de gravedad del bogie al punto de contacto de las ruedas.

d_s : distancia del centro de gravedad del bogie a la suspensión secundaria (lateral).

h_{ts} : distancia vertical del centro de gravedad del vagón a la suspensión secundaria.

h_{cs} : distancia vertical del centro de gravedad del vehículo a la suspensión secundaria.

h_{tp} : distancia vertical del centro de gravedad del eje a la suspensión primaria.

h_{wp} : distancia vertical del centro de gravedad del eje a la suspensión primaria.

V : velocidad del vehículo.

IRREGULARIDADES ALEATORIAS DE LA VÍA

z_{1r} : irregularidad vertical que actúa sobre la rueda derecha del eje 1.

z_{1l} : irregularidad vertical que actúa sobre la rueda izquierda del eje 1.

z_{2r} : irregularidad vertical que actúa sobre la rueda derecha del eje 2.

z_{2l} : irregularidad vertical que actúa sobre la rueda izquierda del eje 2.

z_{3r} : irregularidad vertical que actúa sobre la rueda derecha del eje 3.

z_{3l} : irregularidad vertical que actúa sobre la rueda izquierda del eje 3.

z_{4r} : irregularidad vertical que actúa sobre la rueda derecha del eje 4.

z_{4l} : irregularidad vertical que actúa sobre la rueda izquierda del eje 4.

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1- OBJETIVOS

El presente proyecto tiene por objeto analizar el comportamiento de un sistema de suspensión de un vehículo ferroviario con el fin de estudiar el confort y la seguridad del mismo. Para ello se diseñará un modelo que simule el comportamiento de un vehículo ferroviario que circule por un tramo de vía recta con distintos tipos de perfil.

Se hará un estudio comparativo entre un modelo con sistema de suspensión pasiva y otro de suspensión semiactiva que mejore el comportamiento del anterior y aumente la calidad de marcha mejorando el confort de los usuarios. Este último sistema de suspensión será gobernado por un sistema de control que utiliza lógica difusa. Para realizar la comparación entre ambos modelos se estudiará el comportamiento de las aceleraciones verticales en distintos elementos del vehículo así como del balanceo y el cabeceo de la caja. Para implementar el modelo se utilizará el programa *Matlab* y su aplicación *Simulink*.

Se espera que este proyecto sirva como base para trabajos futuros acerca del comportamiento de los vehículos ferroviarios y mejora de la calidad de marcha y confort de los mismos.

1.2-ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto consta de ocho partes, siendo la primera de ellas la presente introducción. Se describen a continuación los capítulos siguientes de los que está formado el proyecto:

- En el capítulo 2, “sistemas de suspensión”, se describen los elementos de suspensión de los que consta un vehículo ferroviario y se explican los distintos tipos de suspensiones que existen.
- En el capítulo 3, “control basado en lógica difusa”, se introduce el concepto de la lógica difusa y se hace una descripción de su funcionamiento.
- En el capítulo 4, “modelado de un vehículo ferroviario”, se describen los diferentes tipos de modelos que existen para estudiar el comportamiento de un vehículo ferroviario.
- En el capítulo 5, “resultados de simulación”, se describe cómo se ha generado el modelo que va a ser estudiado y se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones.
- En el capítulo 6, “conclusiones y trabajos futuros”, se muestran las conclusiones obtenidas tras analizar los resultados y se plantean las posibilidades de mejora para el modelo estudiado.

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.1- DEFINICIÓN Y FUNCIONES DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN

El sistema de suspensión de un vehículo es el encargado de soportar el peso del vehículo y permitir su movimiento elástico controlado sobre sus ejes y de absorber la energía producida por las irregularidades de la vía para mantener la estabilidad del vehículo, proporcionando mayor confort y seguridad a los pasajeros y/o carga que se transporta.

Además dicho sistema de suspensión debe garantizar la protección de los componentes del vehículo así como de la vía sobre la que circule, cualesquiera que sean el estado de la vía y las condiciones de utilización. La estabilidad del vehículo debe cumplirse cualesquiera que sean los obstáculos, los desniveles de la ruta, el radio de viraje y la pendiente. También debe garantizarse la comodidad de los pasajeros y la protección de las mercancías transportadas, reduciendo en cuanto sea posible los movimientos verticales, longitudinales, transversales y angulares de la parte suspendida.

El sistema de suspensión suele estar ubicado en el vehículo entre el suelo y el bastidor y está constituido genéricamente por los mismos componentes para todo tipo de vehículos diferenciándose en sus tipos y dimensiones de acuerdo a las prestaciones del vehículo y su función.

Las suspensiones de los vehículos constituyen un aspecto fundamental del diseño mecánico de cualquier vehículo. Sin embargo, en la mayor parte de los vehículos el diseño de la suspensión afecta también a otras prestaciones del mismo. Así, en los vehículos ferroviarios el diseño de la suspensión influye sobre la estabilidad estática y dinámica y sobre los esfuerzos rueda-carril, tanto en circulación en curvas como por tramos rectos.

Como consecuencia de su influencia sobre otras prestaciones del vehículo, el diseño de una suspensión no puede realizarse atendiendo exclusivamente a uno de los aspectos afectados por ella, por tanto, no es de extrañar que generalmente las soluciones alcanzadas solo constituyan un compromiso que más o menos tiene en cuenta los imperativos a satisfacer. Todo ello confiere al diseño de la suspensión una gran complejidad y requiere la participación de personas con muchos años de experiencia.

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.2-ELEMENTOS DE SUSPENSIÓN

En la suspensión de un vehículo existen diferentes tipos de elementos que permiten asegurar las funciones de confort, estabilidad, seguridad y calidad de marcha [2]. De forma general, estos elementos pueden dividirse en elementos elásticos y elementos amortiguadores. Los primeros garantizan la unión entre los órganos de rodadura y el vehículo, aportando una fuerza recuperadora cuando se produce alguna separación entre ellos. Los segundos son elementos disipadores de energía que hacen que decaiga el movimiento oscilatorio provocado por cualquier tipo de perturbación que actúe sobre la suspensión. Dependiendo del sistema de suspensión utilizado, algunos elementos cumplen la doble función de ser elementos elásticos y de amortiguamiento.

Si se considera un vehículo desplazándose sobre un terreno horizontal, la situación ideal sería la que permitiera avanzar sobre la superficie de dicho terreno sin que provocase ninguna oscilación de la caja del vehículo. Ahora bien, si existe una unión entre las ruedas y la caja del vehículo, cualquier irregularidad del terreno se transmitirá en cierta forma a la caja y alterará el movimiento de la misma. Dicha unión es, por otra parte, necesaria si se desea que el vehículo y ruedas sigan un recorrido común. Como consecuencia, la transmisión de vibraciones a la caja en algún grado resulta inevitable.

Existen diferentes formas de conseguir la rigidez y amortiguamiento requeridos en una suspensión. Desde la aparición de los primeros vehículos han sido muchos los elementos utilizados para ello. A continuación veremos los sistemas de mayor éxito y que siguen en funcionamiento en nuestros días [3].

Para la comprensión de los apartados siguientes, se tiene que mencionar que cualquier tipo de vehículo consta de las partes siguientes:

- una parte llamada masa suspendida, que es la parte de la masa total que es soportada por el sistema de suspensión. Está constituida por chasis, grupo motor, carrocería etc. además de la carga del vehículo;
- una parte llamada masa no suspendida, formada por el sistema de suspensión y los elementos que conectan dicho sistema con la vía sobre la que circula el vehículo, como son ejes, ruedas, frenos del vehículo si están incluidos fuera del chasis, elementos de transmisión etc.

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.2.1- RESORTES HELICOIDALES

Los resortes helicoidales (figura 2.1) son probablemente los elementos de rigidez más utilizados en las suspensiones de vehículos. Normalmente se utilizan trabajando a compresión y se fabrican a partir de varillas y/o barras de acero de alta resistencia. Su tensión inicial es obtenida, durante el arrollamiento en frío, por una deformación permanente.

En algunos vehículos, en especial en suspensiones ferroviarias, es habitual utilizar resortes montados concéntricamente uno dentro de otro. Este montaje es equivalente a dos resortes en paralelo.



Figura 2.1 – Resorte helicoidal

2.2.2- BARRAS DE TORSIÓN

Las barras de torsión (figura 2.2) son dispositivos que, debido al ablandamiento de la suspensión vertical, se van incorporando a la suspensión de un gran número de vehículos ferroviarios.

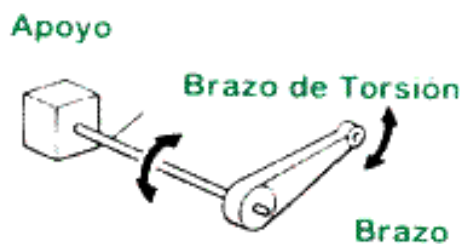


Figura 2.2 – Barra de torsión

Su misión consiste en disminuir el ángulo de balanceo experimentado por el vehículo cuando recorre una curva. Dicho ángulo, además de provocar una mayor fuerza lateral sobre los viajeros (se incrementa la fuerza centrípeta con la componente de la gravedad paralela al piso del vehículo), provoca un desplazamiento lateral del centro de gravedad que tiende a reducir la carga en

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

las ruedas interiores y a aumentarla en las exteriores, lo que incrementa el riesgo de vuelco del vehículo.

En el caso de vehículos ferroviarios, la reducción de la fuerza lateral experimentada por los viajeros permite incrementar la velocidad de paso por las curvas, limitada por este motivo, debido a razones de confort.

2.2.3- BALLESTAS

La ballesta [2] es uno de los componentes de suspensión más antiguo y que todavía perdura debido a sus ventajas de:

- Economía.
- Amortiguamiento propio.
- Capacidad para soportar grandes cargas.
- Realización de funciones adicionales de guiado lateral y longitudinal.

La descripción del resorte de láminas o ballesta se puede visualizar en la figura 2.3. Este tipo de resorte está formado por una serie de láminas de acero superpuestas.



Figura 2.3 – Ballesta

La lámina principal, la más larga, se llama lámina u hoja maestra, terminando generalmente en uno o dos arrollamientos para formar un ojo que sirve para su fijación. A veces la lámina maestra está sostenida, hasta debajo de los puntos de apoyo, por una segunda lámina, que entonces se llama lámina submaestra. Las otras láminas o láminas de sostén son de longitudes desiguales, llamándose a la parte no sostenida de una lámina el escalonado.

Las láminas están ensambladas entre sí por un bulón central o capuchino. Las láminas generalmente son de anchura y grueso constante; sin embargo, la lámina maestra a veces es de mayor grosor que las otras, al tener que resistir esfuerzos de todas clases como consecuencia de los movimientos verticales,

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

longitudinales y transversales de la parte suspendida con respecto a la no suspendida.

Los extremos de las láminas de sostén son rectangulares o de forma trapezoidal o parabólica y a veces, progresivamente, adelgazadas en la longitud de la parte escalonada. La curvatura de las láminas crece a medida que la longitud disminuye, a fin de evitar divergencias entre los extremos de cada una de ellas. La diferencia de curvatura, sin embargo, no debe ser exagerada a fin de evitar fatigas excesivas en las láminas más alejadas de las maestras.

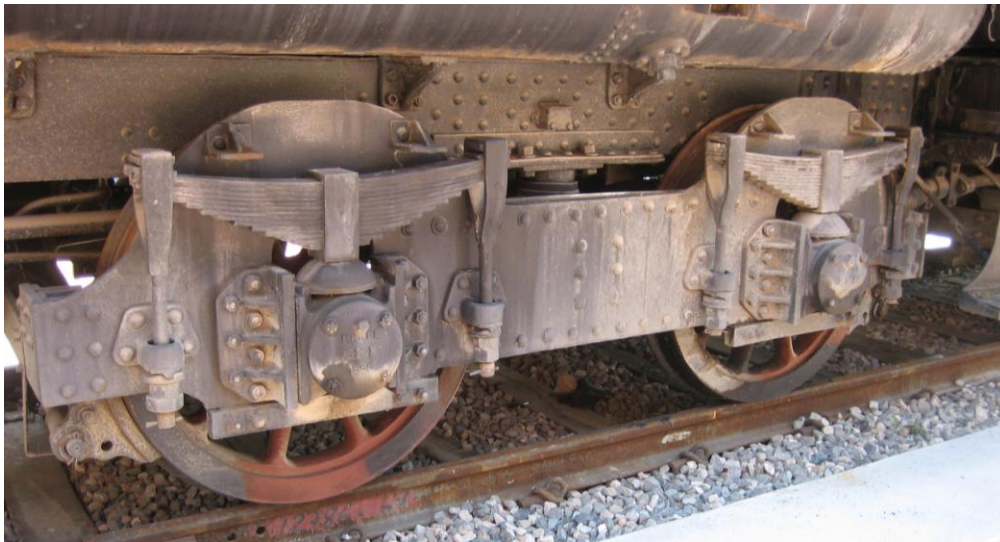


Figura 2.4 – Montaje de ballestas en bogie

El desplazamiento lateral de las láminas entre sí es impedido mediante bridas o abrazaderas, estando guiado el deslizamiento de las láminas de sostén, debido a la modificación de la flecha por nervaduras o tetones centrales.

En vehículos ferroviarios las ballestas se utilizan en trenes de mercancías debido a su gran capacidad de carga. En este caso el montaje se realiza mediante dos anillas, colocadas cada una en un extremo. En la figura 2.4 se observan las ballestas como parte del sistema de suspensión de un vehículo ferroviario.

Se suelen utilizar ballestas de doble flexibilidad, en las que parte de las hojas comienzan a deformarse a partir de una determinada carga. De esta forma, se consigue que la frecuencia natural de la suspensión no cambie demasiado entre las condiciones de tara y carga máxima y, por otra parte, en vehículos ferroviarios se asegura una deformación elevada hasta descarga completa de ruedas, lo cual es una condición necesaria para evitar riesgos de descarrilamiento.

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.2.4- RESORTES DE CAUCHO-METAL

La utilización de resortes caucho-metal resulta muy frecuente como suspensiones de maquinaria, motores etc., en las que es necesario filtrar vibraciones de alta frecuencia asociadas con desplazamientos relativamente pequeños. La mejora de la tecnología de producción de estos elementos ha facilitado su utilización en suspensiones de vehículos. Fundamentalmente sus aplicaciones se centran en vehículos ferroviarios [4], o como elementos accesorios de las suspensiones principales de los automóviles. En la figura 2.5 se muestra una suspensión caucho-metal utilizada en la suspensión primaria de algunas unidades de metro.



Figura 2.5 – Resorte de caucho-metal

Debido a la complejidad de las formas geométricas empleadas y al comportamiento no lineal del conjunto (material no lineal, grandes deformaciones, problemas de contacto, etc.), el dimensionamiento de estos elementos y el cálculo de su rigidez se basa actualmente en la utilización del método de los elementos finitos.

2.2.5- RESORTES NEUMÁTICOS

Los resortes neumáticos se están imponiendo como suspensión de vehículos de carretera pesados (camiones, autobuses) y, en gran parte de las aplicaciones, como suspensión secundaria de vehículos ferroviarios.

Presentan las ventajas siguientes:

- la curva fuerza-deformación es progresiva, lo que proporciona una frecuencia natural, casi independiente de la carga soportada,

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

- al contrario de los resortes, poseen una gran capacidad de filtrado de las frecuencias elevadas,
- permiten mantener altura de suspensión constante, mediante la inyección y extracción de aire de los resortes neumáticos,
- existe la posibilidad de añadir amortiguamiento neumático, evitando la necesidad de incorporar amortiguadores adicionales,
- hacen trabajar a los amortiguadores alrededor de una posición determinada,
- reducen la amplitud de cabeceo y balanceo, al aceptar una ligera corrección dinámica,
- atenúan los ruidos de las ruedas y los frenos, al no existir ninguna unión mecánica directa entre las ruedas y la parte suspendida.

Por otra parte, el mantenimiento de la suspensión neumática es poco costoso y esta suspensión es menos pesada que una suspensión metálica, especialmente cuando el vehículo está ya provisto de un suministro de aire comprimido o aceite a presión utilizado para otros fines.

Por el contrario, presentan los inconvenientes siguientes:

- un deterioro de los resortes o una deficiencia de la fuente de energía deja sin efecto la suspensión, siendo esta la razón de que ciertos constructores combinen la suspensión neumática con una suspensión metálica,
- la suspensión neumática, al carecer de estabilidad longitudinal y transversal obliga a la utilización de órganos de empuje y de reacción, lo cual minimiza la reducción de peso antes señalada.



Figura 2.6 – Resorte neumático en bogie

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Este tipo de resortes se basa en la compresibilidad del aire como elemento de suspensión. Por lo general, consiste en un vástago telescópico que se mueve dentro de un cilindro, el cual contiene nitrógeno con una presión que depende de la fuerza que se desea mover, y es esta presión la que genera la fuerza del resorte. En la figura 2.6 se representa un resorte neumático utilizado en un vehículo ferroviario.

2.2.6- AMORTIGUADORES

Se ha visto que existen algunos componentes de suspensión, como las ballestas, que proporcionan simultáneamente rigidez y amortiguamiento, sin embargo; esto no es siempre así y la mayor parte de los sistemas de suspensión requieren la utilización de elementos amortiguadores.

El amortiguador tiene como misión devolver en el mínimo de tiempo el resorte a su posición de equilibrio, absorbiendo, desde el punto de vista del confort, la energía cinética transmitida a la masa suspendida y reduciendo, desde el punto de vista de la estabilidad en ruta, el tiempo durante el cual varía la adherencia de las ruedas. En la figura 2.7 se presenta un amortiguador como parte del sistema de suspensión de un vehículo ferroviario.

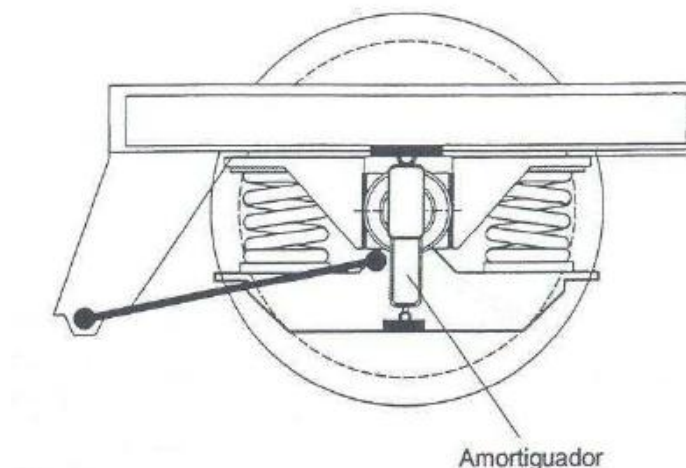


Figura 2.7 – Amortiguador en bogie

El problema a resolver es complicado puesto que, particularmente:

- el amortiguamiento está solicitado por dos movimientos oscilatorios diferentes,
- es necesario frenar simultáneamente las oscilaciones de la masa suspendida y las de la masa no suspendida a fin de evitar el rebote de

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

las ruedas sin endurecer demasiado la suspensión, ya que las frecuencias de oscilación de estas masas son muy diferentes entre sí,

- toda acción del amortiguador sobre la rueda encuentra normalmente su reacción sobre la parte suspendida, a menos de amortiguar separadamente las oscilaciones de la parte suspendida y de la parte no suspendida, o cuando menos, reducir estas últimas mediante un dispositivo especial,
- es conveniente que el amortiguador no intervenga, o en todo caso poco, para las oscilaciones de poca amplitud y de alta frecuencia, pues de lo contrario la masa suspendida estaría sometida a trepidaciones sin obtenerse una mejora sensible de la estabilidad en ruta,
- la velocidad y la aceleración de las oscilaciones son función no solo de la amplitud sino también de la frecuencia, y esta última varía, para una rigidez determinada, de acuerdo con el estado de carga, a menos que la rigidez no varíe en función de la carga de manera apropiada, para obtener una frecuencia constante.

Existen clases distintas de amortiguadores utilizados en los sistemas de suspensión [5]. Los más usados pueden clasificarse en dos grupos:

- Amortiguadores de fricción.
- Amortiguadores hidráulicos.

Los amortiguadores de fricción se utilizan en suspensiones de vagones de mercancías de vehículos ferroviarios. Constan de elementos de fricción a los cuales se deriva o se hace pasar parte de la carga vertical que los precomprimen. Otras veces, la precompresión se obtiene mediante resortes específicos. La fricción generada de estos elementos por el movimiento de la suspensión proporciona una fuerza amortiguadora. Amortiguadores de este tipo se utilizan en los bogies europeos Y-25, figura 2.8.



Figura 2.8 – Bogie europeo Y-25

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Los amortiguadores de fricción presentan varias desventajas entre las que cabe citar:

- en tanto no se supera la fuerza de fricción la suspensión permanece bloqueada, y el vehículo queda sin suspensión,
- una vez superada la fuerza de fricción, la fuerza amortiguadora disminuye en vez de aumentar con la velocidad como sería deseable,
- su comportamiento se altera con el desgaste,
- es necesario reponer las piezas desgastadas periódicamente.

Como consecuencia de estas limitaciones, tanto en vehículos de carretera, como en los ferroviarios destinados a servicios de pasajeros, se han impuesto los amortiguadores hidráulicos. En estos la fuerza amortiguadora es función creciente con la velocidad.

Básicamente, los amortiguadores hidráulicos constan de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que existe aceite a ambos lados del pistón (debido a que los obstáculos están repartidos al azar y que la probabilidad de encontrar un obstáculo en relieve es la misma que la de encontrar una depresión, es conveniente que el amortiguador sea de doble efecto). Sobre este, existen una serie de orificios y una válvula adicional precomprimida que permite el paso de aceite de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un valor dado.

Existen varios tipos de amortiguadores en el mercado. Los más comunes en ferrocarriles son los de doble tubo presurizados, cuyo fluido de trabajo es aceite y no presurizados (figura 2.9), que utilizan aceite y gas; y los amortiguadores monotubo presurizados (figura 2.10). La solución de amortiguamiento más económica es la de doble tubo no presurizado.

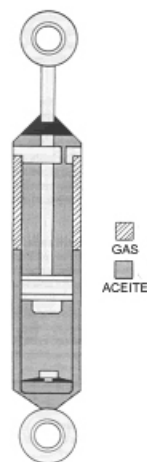


Figura 2.9 – Amortiguador de doble tubo



Figura 2.10 – Amortiguador monotubo

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.3-SUSPENSIONES EN VEHÍCULOS FERROVIARIOS

2.3.1-BOGIE

El bogi o bogie (figura 2.11) es la estructura rodante sobre la que descansan los vagones de ferrocarril y las locomotoras actuales que no utilizan ejes simples [4].

Las funciones principales del bogie son:

- soportar la carrocería del vehículo ferroviario,
- proporcionar estabilidad en tramos de vías rectas y en curvas,
- garantizar el confort de marcha mediante la absorción de las vibraciones y minimizar las fuerzas centrífugas cuando el tren circula por curvas a alta velocidad,
- minimizar la generación de irregularidades en la vía ferroviaria y la abrasión de la misma.

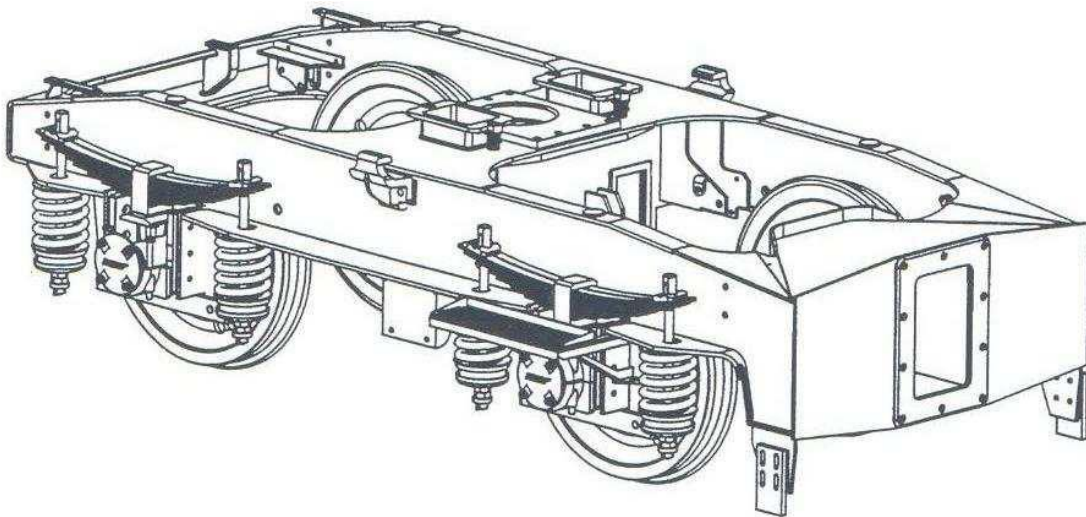


Figura 2.11 – Bogie

Por lo general, se colocan dos bogies en cada coche, vagón o locomotora, una en cada extremo. Una configuración utilizada en los vehículos articulados, consiste en colocar los bogies en la conexión entre los coches o vagones de tren.

La mayoría de los bogies utilizan el diseño más simple, el cual cuenta con dos ejes; pero algunos vehículos diseñados para cargas pesadas, han sido contruidos con un máximo de cinco ejes por bogie.

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Los componentes clave de un bogie incluyen:

- El bastidor del bogie en sí.
- La suspensión para absorber los choques entre el bastidor del bogie y la carrocería de los vehículos ferroviarios. Los tipos más comunes son los resortes en espiral o los balones de aire.
- Por lo menos un juego de ruedas, compuesto por un eje con rodamientos y ruedas en cada extremo.
- Equipamiento de frenado. Los dos equipamientos más conocidos son mediante zapatas de freno, que se presionan contra la banda de rodadura de la rueda, y mediante frenos de disco y pastillas. Además, existe otro sistema basado en corrientes de Foucault, que provoca una fuerte deceleración y cuyo uso está por tanto restringido a frenados de emergencia.
- En los bogies motores, los mecanismos que provocan el movimiento, es decir, los motores y mecanismos de tracción.
- Elementos auxiliares como pueden ser antenas, sistemas de limpieza, balizas para diferentes usos, valvulería neumática, sistemas de medición de velocidad y cajas de grasa, que son los elementos de unión entre los ejes y el bastidor del bogie.

Como se acaba de comentar, en el bogie va instalado el sistema de suspensión de un tren. Se puede diferenciar la suspensión primaria y secundaria, cuya función y funcionamiento se explica a continuación.

2.3.2.-SUSPENSIÓN PRIMARIA

Entre el conjunto de ejes y ruedas y el bastidor del bogie, siempre se intercala un sistema de suspensión que, como primer órgano flexible entre dicho conjunto y el tren, se denomina suspensión primaria [4].

La suspensión primaria cumple dos funciones. Por una parte reduce el nivel de vibraciones que soporta el bastidor del bogie y los elementos montados sobre él. Por otra parte asegura un reparto homogéneo de cargas sobre las ruedas, lo cual es fundamental de cara a las prestaciones de freno y tracción y para evitar el riesgo de descarrilamiento.

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Los elementos de la suspensión primaria, además de asegurar la suspensión vertical, están relacionados con el guiado de los ejes en direcciones longitudinales y laterales. Las rigideces de guiado resultan determinantes para definir la estabilidad dinámica del vehículo y los esfuerzos rueda-carril que se producen al paso por la curva.

A medida que aumentan las sollicitaciones dinámicas y velocidades, estas suspensiones primarias se complican, pasando del simple montaje de resorte y amortiguador, o de campanas de goma o caucho, a montajes muy complejos y avanzados como los dos que se muestran en la figura 2.12.

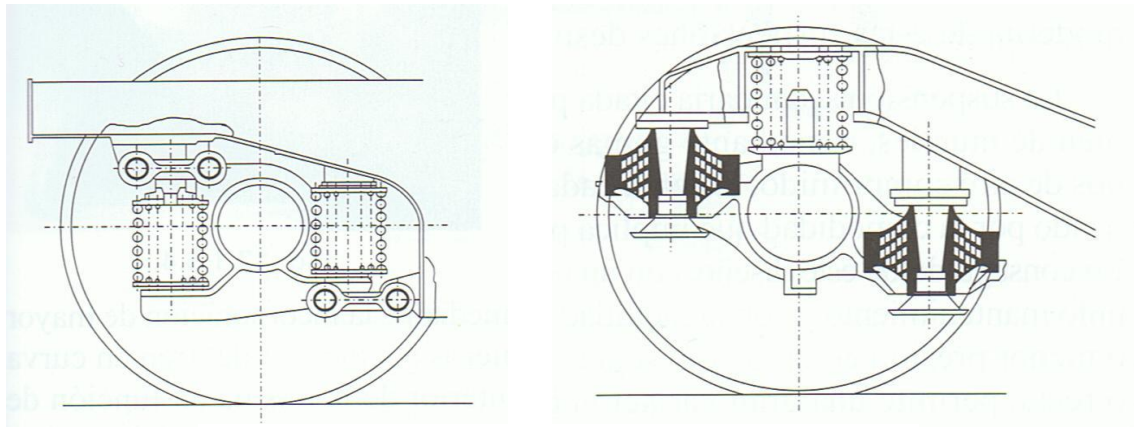


Figura 2.12 – Montajes de suspensión primaria en bogie

Las suspensiones primarias de los ferrocarriles hoy día suelen ser bastante simples aparentemente, en la figura 2.13 se aprecia el montaje de estas suspensiones de caucho en un bogie, siendo crucial el proyecto de ciclo de histéresis del conjunto y de la fatiga del elemento elástico que, con el paso del tiempo, va provocando la bajada o reducción de su altura y, consecuentemente, el recalce o incorporación de la goma dentro de la campana soporte. Ello implica la realización de periódicas mediciones de dicha altura y, en su caso, la incorporación de calas de suplemento.

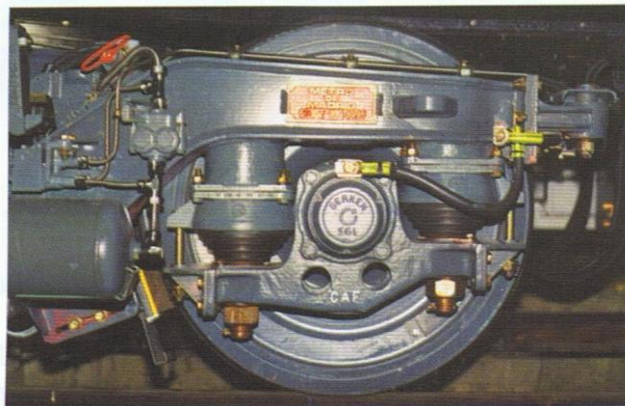


Figura 2.13 – Suspensión primaria en bogie de unidad de metro

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Las características en cuanto a curvas de rigidez elástica vertical y horizontal deben siempre analizarse, así como las deformaciones máximas y las características en cuanto a resistencia y fluencia.

Una de las líneas de investigación existentes hoy en día en el apartado de mejora del funcionamiento de este tipo de suspensiones, consiste en incluir articulaciones entre los largueros principales del bogie, como se muestra en la figura 2.14 [4]. Esto presenta la ventaja de la capacidad de absorción de irregularidades entre los carriles de la vía; aspecto muy importante cuando los niveles de calidad de la vía no son buenos.

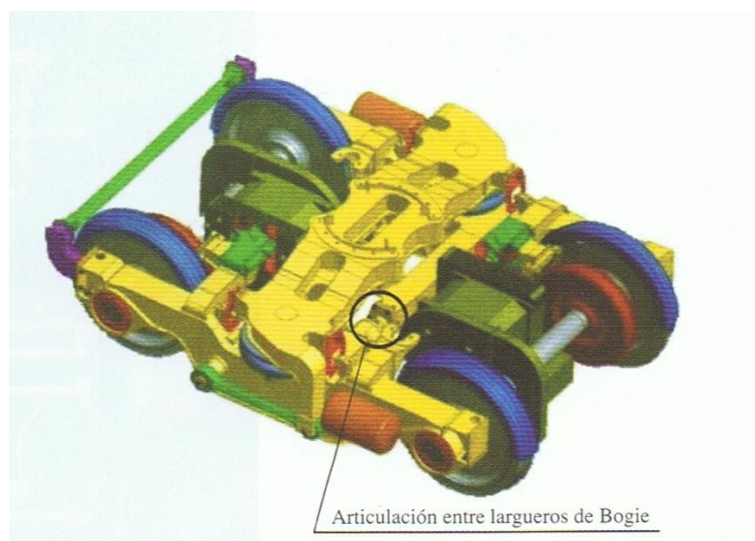


Figura 2.14 – Detalle de articulación entre largueros principales del bogie

2.3.3.-SUSPENSIÓN SECUNDARIA

A su vez, entre la propia caja del coche ferroviario y el bogie, hay una segunda suspensión que, como tal, se denomina suspensión secundaria [2].

La suspensión de los vehículos ferroviarios debe asegurar el filtrado de las vibraciones, no sólo en dirección vertical, sino también en dirección lateral. Este filtrado, en los vehículos guiados, es responsabilidad de la suspensión secundaria. Por este motivo, las suspensiones secundarias presentan una alta flexibilidad en ambas direcciones, vertical y lateral.

En dirección vertical es habitual la utilización de suspensiones con frecuencia natural próxima a 1 Hz. Esta elección se debe a que es a esta frecuencia a la que el ser humano mejor soporta los movimientos verticales, debido a que el centro de gravedad de nuestro cuerpo oscila con esta frecuencia al caminar, y

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

a que nuestros órganos internos se mueven durante la marcha oscilando verticalmente aproximadamente con esta frecuencia [6].

La suspensión secundaria puede ser también de muelles, o mediante gomas o balones llenos de aire comprimido; sistema muy utilizado por la comodidad que supone para el viajero, en redes a velocidades moderadas. Este diseño ofrece numerosas ventajas. Una de ellas es que el mantenimiento es nulo o mínimo. Por otro lado, es posible una facilidad de regulación mediante la incorporación de mayor o menor presión en los balones de aire según la carga de viajeros o situación del tren en curva o recta y mantiene constante el nivel de la altura de piso respecto a la altura de carriles. Adicionalmente, de la presión incorporada se obtiene la información de carga de viajeros, necesaria para la regulación eléctrica de motores, a fin de conseguir procesos de arranque y freno a aceleración constante e independiente de dicha carga de viajeros.

El montaje real de estas suspensiones neumáticas (figura 2.15) consiste en disponer un balón de aire por cada lado del costado del bogie, sobre los cuales descansa la caja a través de una viga (comúnmente denominada “bailadora” por su giro sobre el rodamiento de bolas o rodillo superior).

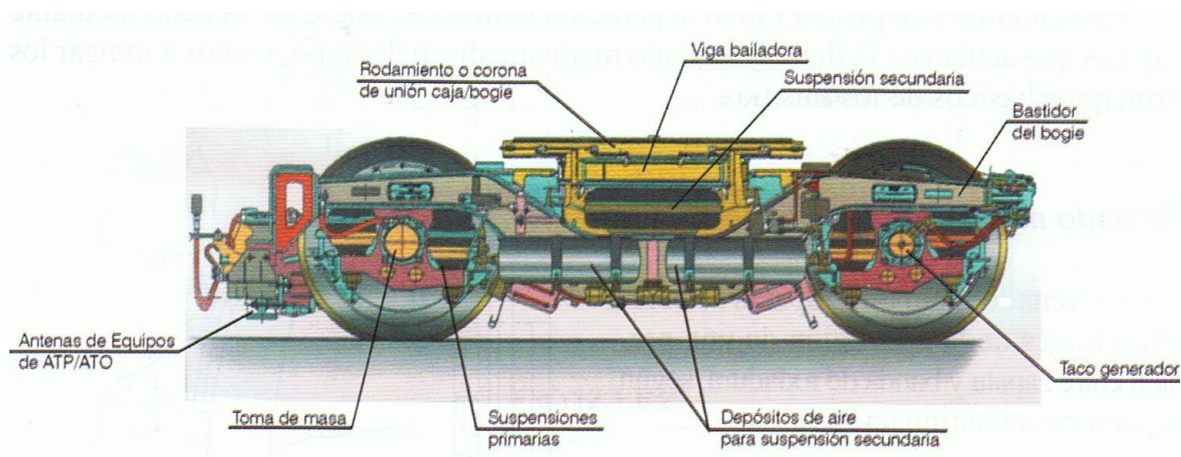


Figura 2.15 – Montaje de sistema de suspensión

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.4-TIPOS DE SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Conocidas las funciones que debe proporcionar un sistema de suspensión conviene saber qué tipo de suspensión es el más adecuado dependiendo de la aplicación que tenga el vehículo ferroviario [7].

Los sistemas de suspensión más utilizados en la actualidad son tres:

- Suspensión pasiva.
- Suspensión activa.
- Suspensión semiactiva.

2.4.1-SISTEMA DE SUSPENSIÓN PASIVA

La suspensión pasiva es aquella en la que no se aporta energía al sistema. Está formada por los dispositivos mecánicos (resortes, amortiguadores, etc.) que se describieron en el apartado 2.2, elementos de suspensión. La mayoría de los vehículos utilizan este tipo de sistema de suspensión.

2.4.2-SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA

El sistema de suspensión activa está formado por actuadores cuya función es ejercer una fuerza entre el chasis y la rueda para modificar el comportamiento del vehículo ante las irregularidades. Un ordenador se encarga de recoger los datos tomados por sensores distribuidos estratégicamente para poder enviar las señales adecuadas a los actuadores y que estos operen de forma que se mantenga un nivel máximo de estabilidad. Un buen sistema de suspensión activa debe tener un corto tiempo de respuesta para poder reaccionar rápidamente ante las irregularidades de la vía [2]. Además, por seguridad, todo sistema de suspensión activa tiene asociado uno de suspensión pasiva, el cual siempre estará presente en caso de fallo del sistema de control o de los actuadores.

La principal ventaja de este sistema frente a la suspensión pasiva es que permite un control independiente de los elementos de suspensión ubicados en diferentes puntos del vehículo. Gracias a este control se consiguen mejoras en confort, seguridad y estabilidad dinámica del vehículo, ya que se reducen los esfuerzos rueda-carril, las vibraciones y el centrado de la carrocería en el paso por curva [8].

2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

La principal desventaja de la suspensión activa es su elevado coste, principalmente para el control sobre altas frecuencias, cuya implementación resulta demasiado cara. También cabe destacar que este dispositivo necesita una gran potencia para funcionar que adquiere del motor, ya que se necesita energía que haga funcionar los actuadores. Esto puede llegar a ser una gran desventaja en algunas aplicaciones.

2.4.3-SISTEMA DE SUSPENSIÓN SEMIACTIVA

Una suspensión semiactiva basa su funcionamiento en la modificación de los parámetros de algún elemento (por ejemplo, la densidad del fluido de trabajo de un amortiguador) del sistema a partir de los datos que recogen una serie de sensores colocados en el vehículo. Dichos datos son interpretados por un sistema de control que envía las órdenes necesarias para modificar el funcionamiento del sistema de suspensión.

De gran interés son los llamados sistemas de suspensión reológicos, basados en fluidos inteligentes. La principal característica de este tipo de fluidos es que sus propiedades pueden cambiar en función de la intensidad de un campo eléctrico (suspensión electrorreológica) o magnético (suspensión magnetorreológica) que le sea aplicado. Así, un fluido inteligente dentro de un amortiguador puede cambiar su densidad y por consiguiente el comportamiento del amortiguador dependiendo de la intensidad del campo eléctrico o magnético que se le aplique (figura 2.16). Este campo será creado en función de la señal recibida por los sensores situados en la carrocería del vehículo [7].

También cabe destacar los amortiguadores basados en electroválvulas, que pueden cambiar la cantidad de fluido dentro del amortiguador en función de la apertura de estas, modificando así el comportamiento del amortiguador.

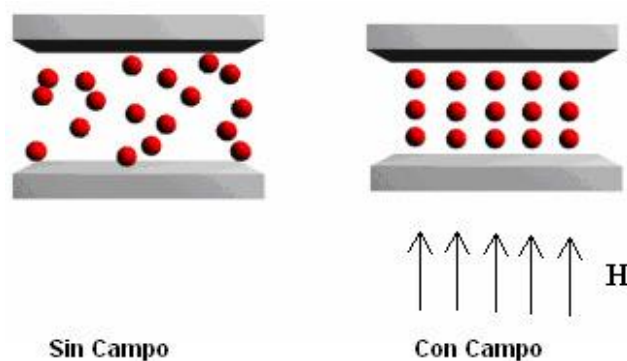


Figura 2.16 – Modificación de las propiedades de un fluido magnetorreológico al aplicarle un campo magnético H

3. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

3. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

3.1- INTRODUCCIÓN

Representar nuestras estructuras lógicas de razonamiento es difícil. Desde los inicios de la sofística de Platón hasta nuestros días han surgido varias teorías de representación lógica; una de las más relevantes es la de Lofti A. Zadeh, creador de la teoría de lógica difusa (también conocida como lógica borrosa) en 1965.

Zadeh estudió los problemas básicos de la lógica clásica a la hora de expresar nuestros razonamientos. Por un lado, conceptos sin definición clara:

¿Qué es una persona joven?, ¿entre 16 y 30?, ¿entre 20 y 30?, ¿entre 25 y 35?, ¿a partir de qué edad una persona deja de ser joven?, ¿a partir de los 30?, ¿a partir de los 35?, etc.

Por otra parte, la lógica clásica es demasiado restrictiva. Una afirmación no puede ser ni verdadera ni falsa en un determinado grado:

“Yo leeré El Quijote”. ¿En qué medida es cierto?, ¿de quién nos fiamos más?, ¿de un alumno en plena adolescencia que necesita leerlo porque se lo han mandado, de un alumno de universidad que necesita aprender sobre Cervantes o de un trabajador que quiere ilustrarse? Depende de quién lo diga, del contexto, etc.

“Él es bueno en matemáticas”. ¿Es bueno, muy bueno, moderadamente bueno?, etc.

Han surgido distintas teorías lógicas para solucionar estos problemas, dando varios valores posibles de verdad a los predicados, por ello el nombre de lógicas multivaluadas. Se muestran en las figuras 3.1 y 3.2 dos esquemas que clasifican las teorías lógicas.

3. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

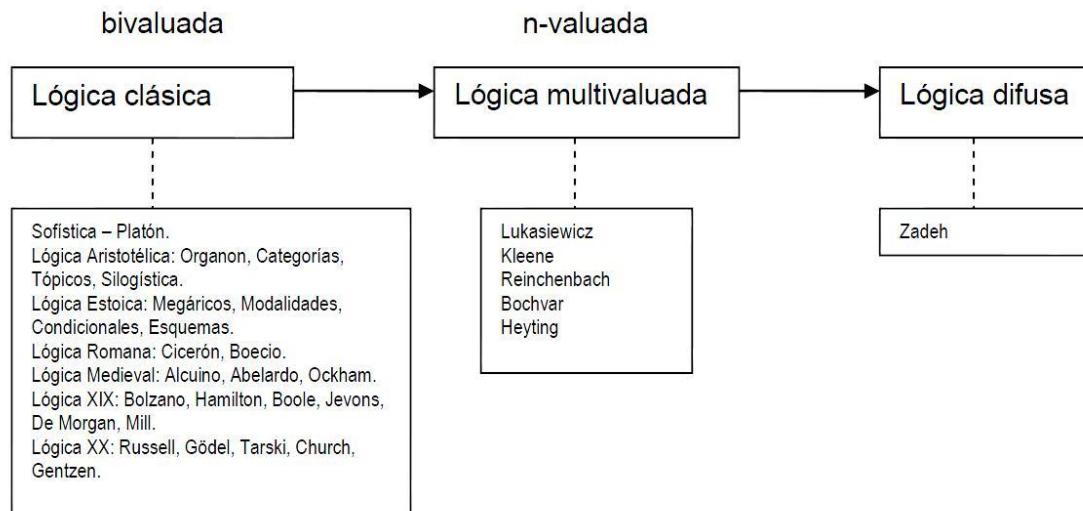


Figura 3.1 – Esquema de distintas teorías lógicas

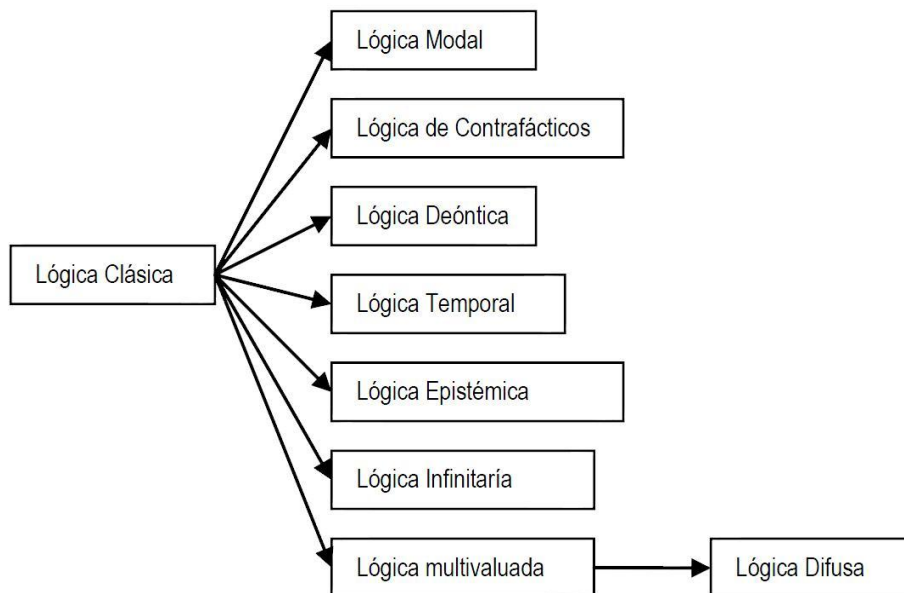


Figura 3.2 – Clasificación de las teorías lógicas

La lógica difusa [9] es una generalización de las lógicas multivaluadas diseñada para permitir el razonamiento sobre conceptos imprecisos. De este modo, se pueden formalizar proposiciones como “la velocidad del motor es muy alta” o “el paciente tiene una fiebre moderada”, que son difíciles de representar adecuadamente en la lógica clásica.

Definida formalmente, la lógica difusa es una lógica multivaluada que permite una gradación continua en el valor de verdad de una proposición, al poder utilizar cualquier valor en el intervalo $[0,1]$.

3.2.-CONJUNTOS DIFUSOS

Zadeh propuso una idea simple, pero genial, de asignar a los elementos de un conjunto una función de pertenencia que asigna valores en el intervalo continuo $[0,1]$, de manera que puede haber elementos del conjunto con un grado de pertenencia intermedio.

Por tanto, un conjunto difuso se define como una función de pertenencia:

$$\mu_z: x \rightarrow [0,1]$$

Cuanto más cerca esté $\mu_z(x)$ del valor 1, mayor será la pertenencia del objeto x al conjunto.

Los valores de pertenencia varían entre 0 y 1. Esta forma de definir conjuntos es más apropiada que la clásica para modelar conceptos imprecisos como por ejemplo “niño”, “joven”, “adulto” o “anciano”. Un individuo de 20 años es “joven”, es decir $\mu_{\text{joven}}(20) = 1$, pero el caso no es tan claro para alguien de 31 años $\mu_{\text{joven}}(31) = 0.4$, también se puede decir $\mu_{\text{adulto}}(31) = 0.6$.

Aunque en principio cualquier función que asigne valores en el intervalo $[0,1]$ puede emplearse para definir un conjunto difuso, en el diseño de sistemas difusos suele emplearse siempre el mismo tipo de funciones. Por simplicidad, en la mayoría de los sistemas, dichas funciones se suelen especificar mediante polígonos generalmente trapezoides o triángulos. En la figura 3.3 se muestran las funciones más utilizadas en lógica difusa.

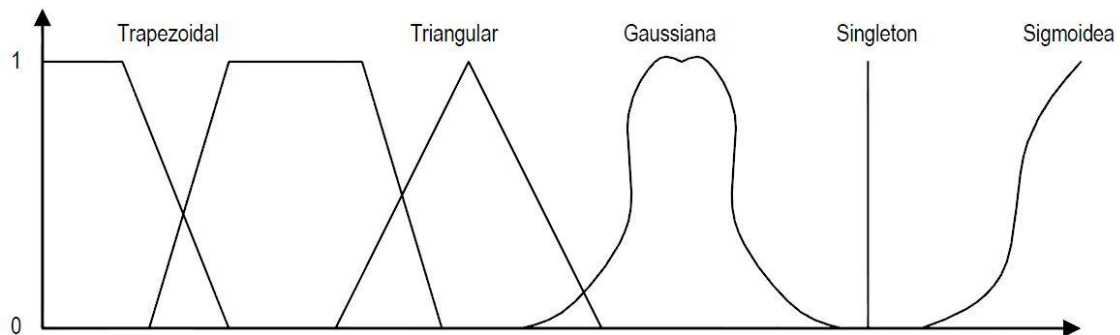


Figura 3.3 – Funciones más utilizadas en lógica difusa

Se define como variable lingüística a la que está formada por varios conjuntos difusos cuyas funciones de pertenencia se refieren a un concepto común. En la figura 3.4 se muestra el ejemplo para la variable “edad” (niño, joven, adulto y anciano).

Los sistemas difusos utilizan variables lingüísticas como variables de entrada y salida. Por ello, el primer paso en el diseño de un sistema difuso consiste en identificar dichas variables, su dominio, los conjuntos difusos que las forman y los modificadores permitidos.

3. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

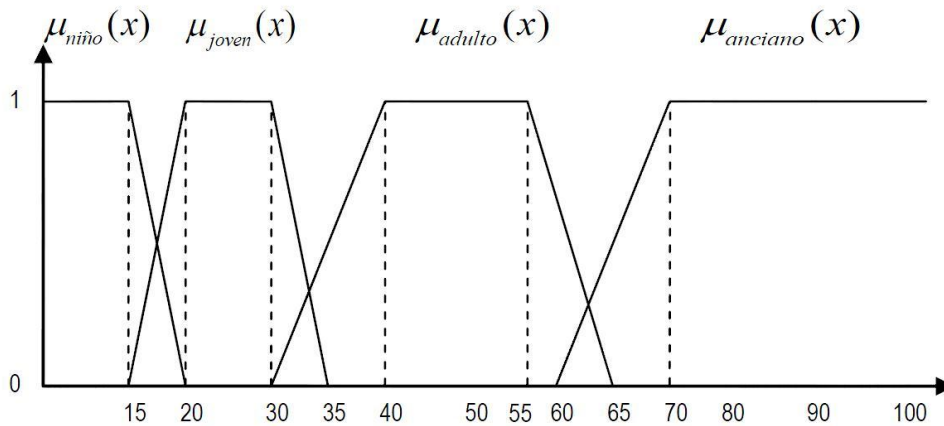


Figura 3.4 – Ejemplo de variable lingüística: Edad

3.3-OPERACIONES BÁSICAS CON CONJUNTOS

Las operaciones básicas que se pueden realizar en un conjunto clásico también pueden realizarse en un conjunto borroso. Las operaciones básicas más comunes son:

Negación: en este caso se centra en uno solo de los conjuntos. Se define la negación de un conjunto como todos aquellos elementos que forman parte de su universo de discurso, pero no forman parte de él. Es el grado en que x no es A (figura 3.5):

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

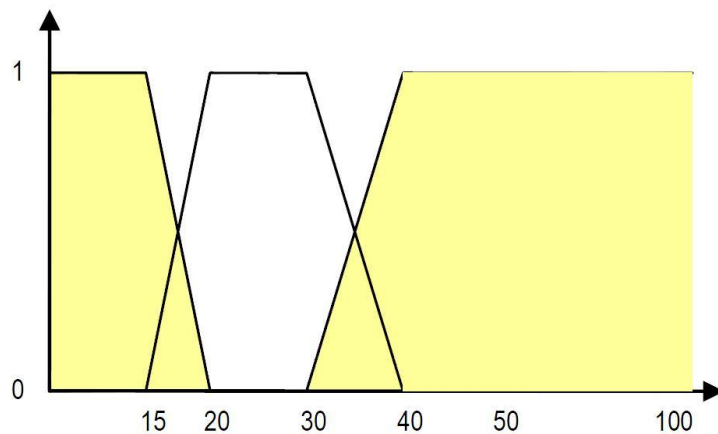


Figura 3.5 – Ejemplo gráfica de la función de pertenencia: x no es joven

3. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

Unión: en este caso, el resultado es un conjunto en el que se encuentran todos aquellos elementos de un conjunto que no existen en el otro y viceversa. En la representación gráfica, serían aquellas zonas en las que la superposición de ambas funciones de pertenencia no tuviera puntos en común. Es el grado en que x es A o B (figura 3.6):

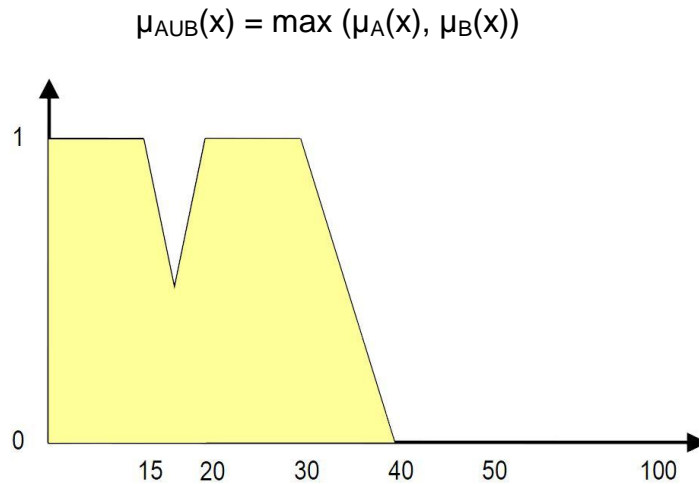


Figura 3.6 – Ejemplo gráfica de la función de pertenencia: x es un niño o un joven

Intersección: el resultado de esta operación entre dos conjuntos borrosos será un conjunto borroso en el que se encuentren aquellos elementos que están en ambos conjuntos. Si se piensa según sus funciones de pertenencia, se puede decir que si se superponen ambas gráficas, la intersección es la zona de la gráfica en la que coinciden ambas funciones. Es el grado en que x es A y B (figura 3.7):

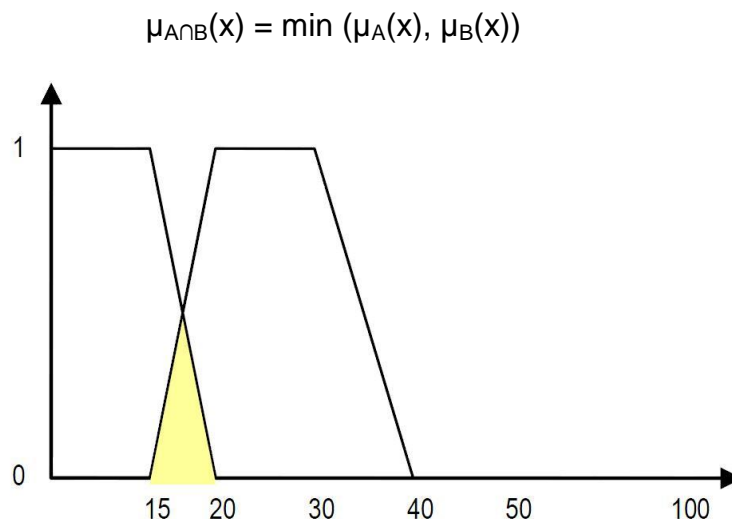


Figura 3.7 – Ejemplo gráfica de la función de pertenencia: x es un niño y un joven

3. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

3.4-FUNCIONAMIENTO DE LA LÓGICA DIFUSA

Una etiqueta lingüística (término compuesto) se forma con la unión de modificadores y términos lingüísticos (también se considera la negación): Muy alto, no muy bajo, moderadamente alto, etc.

Normalmente se definen los conjuntos difusos de los términos primarios (bajo, normal, alto) y a partir de estos se calculan los conjuntos difusos de los términos compuestos.

Cada modificador es un operador que transforma el conjunto difuso del término primario en otro conjunto difuso.

Acciones del modificador:

- Restringir: Muy.
- Dilatar: Moderadamente (más o menos).

La lógica borrosa se basa en reglas heurísticas de la forma SI (antecedente) ENTONCES (consecuente), donde el antecedente y el consecuente son también conjuntos difusos, ya sea puros o resultado de operar con ellos. Sirvan como ejemplos de regla heurística para esta lógica:

- SI hace muchísimo calor ENTONCES disminuyo drásticamente la temperatura.
- SI voy a llegar un poco tarde ENTONCES aumento levemente la velocidad.

Los métodos de inferencia para esta base de reglas deben ser simples, veloces y eficaces. Los resultados de dichos métodos son un área final, fruto de un conjunto de áreas solapadas entre sí (cada área es resultado de una regla de inferencia). Para escoger una salida concreta, a partir de tanta premisa difusa, el método más usado es el del centroide en el que la salida final será el centro de gravedad del área total resultante.

Las reglas de las que dispone el motor de inferencia de un sistema difuso pueden ser formuladas por expertos, o bien aprendidas por el propio sistema, haciendo uso en este caso de redes neuronales para fortalecer las futuras tomas de decisiones.

Los datos de entrada suelen ser recogidos por sensores, que miden las variables de entrada de un sistema. El motor de inferencias se basa en chips difusos, que están aumentando exponencialmente su capacidad de procesamiento de reglas año a año.

3.5-CONTROLADORES BORROSOS

Los controladores son una aplicación práctica de la lógica difusa. En general, un control de un sistema tiene por objeto garantizar una determinada respuesta en la salida de dicho sistema.

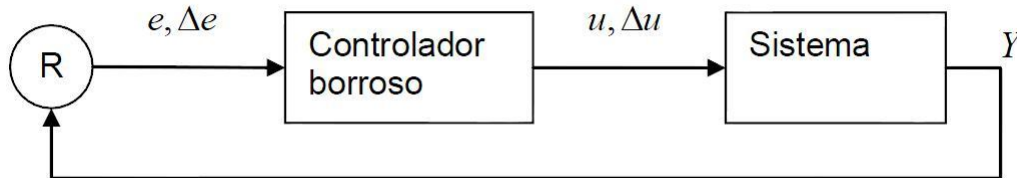


Figura 3.8 – Esquema de control borroso

En la figura 3.8 se muestra el esquema de un control borroso donde Y es la salida, R es el valor de referencia, e el error (diferencia entre la medida de salida y el objetivo de referencia en un instante de tiempo), Δe el incremento del error entre dos instantes de tiempo consecutivos, u la variable de control y Δu el incremento del valor de la variable de control entre dos instantes de tiempo consecutivos.

Se denomina regulación a la acción permanente en el tiempo tendente a mantener Y próximo a un valor de referencia R . Un modelo de control es aquel que permite definir en cada momento las acciones (valores de la variable u) que regulan el sistema. El controlador borroso es el encargado de decidir qué acciones tomar con e y Δe para cada una de las variables de entrada a analizar.

Un controlador borroso tiene:

- Una base de conocimiento con reglas borrosas.
- Un motor de inferencia borroso.

Las reglas de la base de conocimiento se formulan:

R_1 : Si e es A_{11} y Δe es A_{21} entonces Δu es A_{31} .

R_2 : Si e es A_{12} y Δe es A_{22} entonces Δu es A_{32} .

...

R_n : Si e es A_{1n} y Δe es A_{2n} entonces Δu es A_{3n} .

3. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

donde A_{nm} son términos lingüísticos definidos respecto a las medidas porcentuales correspondientes a cada variable de desviación. En la figura 3.9 se muestran posibles valores que puede tomar A_{nm} :

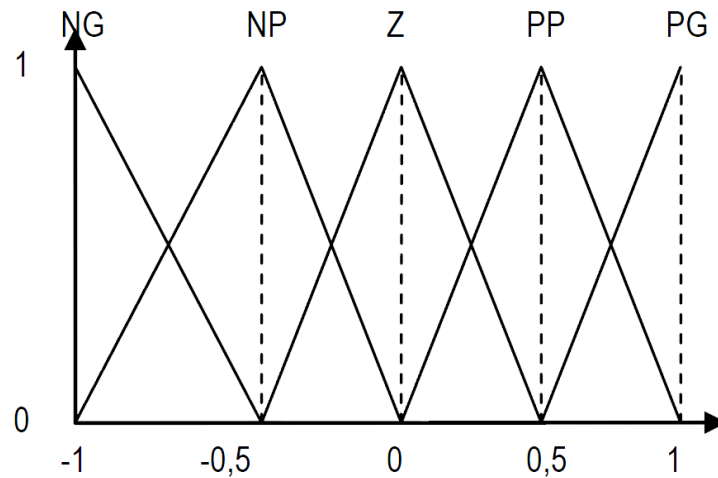


Figura 3.9 – Términos lingüísticos

NG: negativo grande.

PP: positivo pequeño.

NP: negativo pequeño.

PG: positivo grande.

Z: cero.

3.6- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA LÓGICA BORROSA

Como principal ventaja de la lógica difusa, cabe destacar los excelentes resultados que brinda un sistema de control basado en lógica difusa: ofrece salidas de una forma veloz y precisa, disminuyendo así las transiciones de estados fundamentales en el entorno físico que controle. Por ejemplo, si el aire acondicionado se encendiese al llegar a la temperatura de 30°C, y la temperatura actual oscilase entre los 29°C y los 30°C, nuestro sistema de aire acondicionado estaría encendiéndose y apagándose continuamente, con el gasto energético que ello conllevaría. Si estuviese regulado por lógica difusa, esos 30°C no serían ningún umbral, y el sistema de control aprendería a mantener una temperatura estable sin continuos apagados y encendidos.

Del mismo ejemplo puede observarse otra de las principales ventajas de estos sistemas, que es la capacidad de adelantarse en el tiempo a los acontecimientos, estabilizando siempre el entorno físico que controla.

3. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

Como principal inconveniente cabe destacar la dificultad de elegir una correcta función de pertenencia para los conjuntos difusos, ya que en ocasiones no es sencillo especificar el efecto de los cuantificadores de nuestro lenguaje en dicha función. El hecho de que cualquier función de pertenencia del sistema estuviese mal especificada, haría fallar, muy probablemente, todo el sistema completo.

Otro inconveniente es la indecisión de decantarse por los expertos o por la tecnología, principalmente mediante redes neuronales, para reforzar las reglas heurísticas iniciales de cualquier sistema de control basado en este tipo de lógica.

4. MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

4. MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

En este capítulo se explican los modelos más utilizados y cuál de ellos es el elegido para el diseño del sistema de suspensión [10]. En la figura 4.1 se presenta el modelo simplificado de un vehículo con bogies.

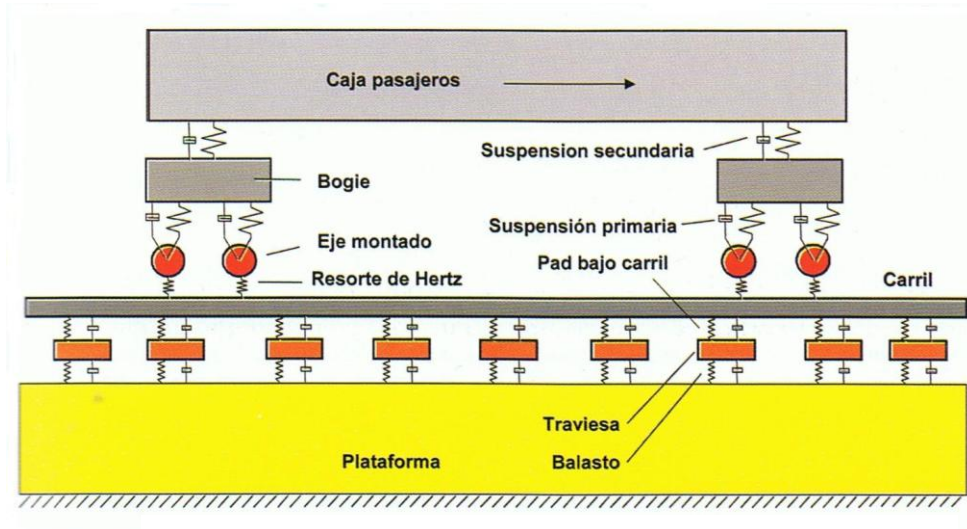


Figura 4.1 – Modelo simplificado de un vehículo de bogies

4.1- MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD

A efectos de interés el modelo más sencillo es el de una masa suspendida por un resorte y un amortiguador, moviéndose sobre un perfil longitudinal que puede ser una carretera o un raíl de ferrocarril (figura 4.2).

Este modelo de una masa suele utilizarse para simular el eje montado circulando sobre la vía. El resorte y el amortiguador simulan los elementos situados bajo la rueda, es decir, el contacto rueda-carril, la rigidez del pad bajo patín y las rigideces de las capas inferiores, balasto, subbalasto y plataforma. La masa vibrante en este caso es la del eje montado.

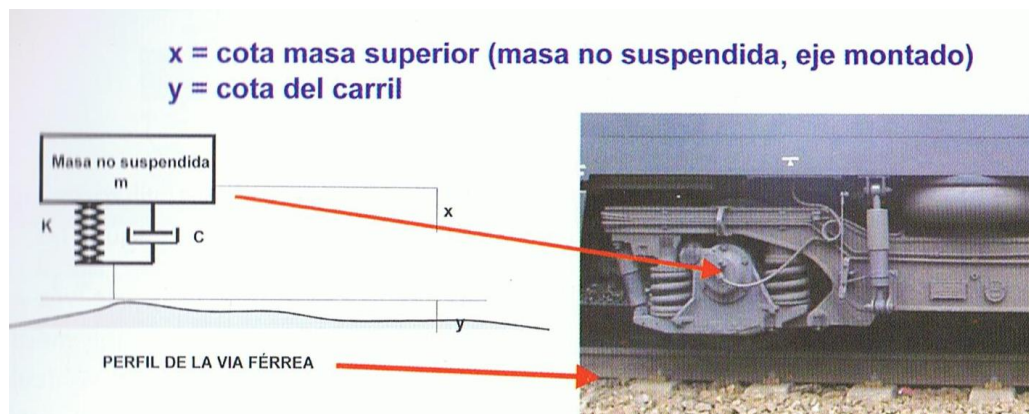


Figura 4.2 – El modelo de un masa. Eje montado y vía

4. MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

4.2- MODELO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD. EL CUARTO DE BOGIE

El sistema lineal de dos masas es sumamente útil en la ingeniería ferroviaria. Y también en la de carreteras, puesto que de este modelo ha salido el conocido índice IRI, el Índice de Regularidad Internacional con el que se mide la calidad de un pavimento a partir de su perfil longitudinal.

Es un modelo igual al del apartado anterior con una masa vibrante pero que tiene otra masa superior conectada por resorte y amortiguador a la masa inferior. Esta otra masa simula la estructura del bogie. Entre ambas masas se sitúa la suspensión primaria del vehículo (figura 4.3).

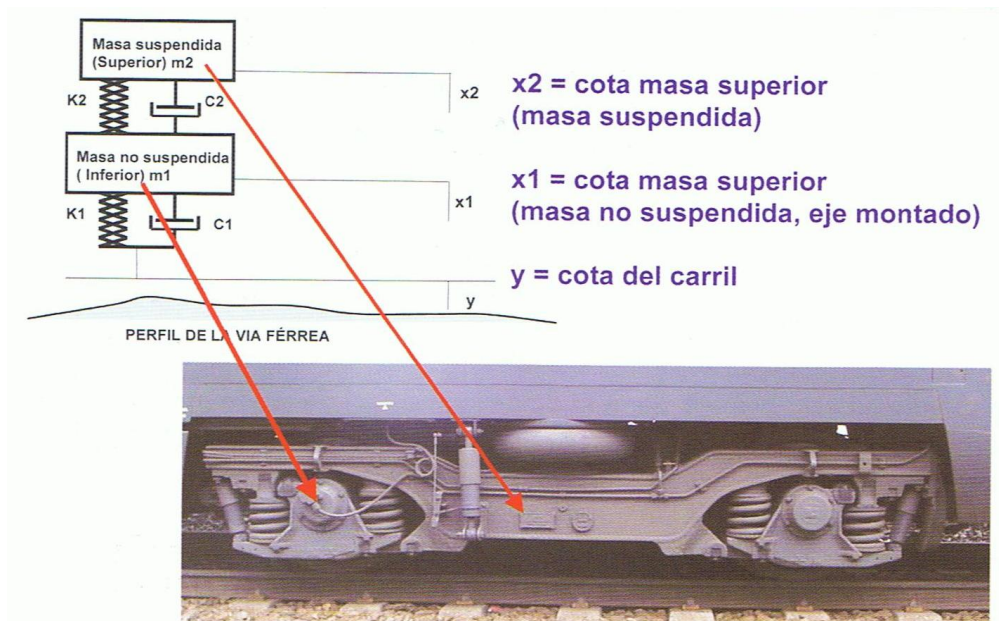


Figura 4.3 – El modelo de dos masas. Eje y bogie

4.3- MODELO DE BOGIE DE TRES GRADOS DE LIBERTAD

A veces es más conveniente utilizar un modelo de tres masas vibrantes. En este caso una modelización puede ser: el eje montado circulando sobre la vía es la masa inferior, la estructura del bogie encima es la masa intermedia y la masa superior es la caja de pasajeros y de la locomotora.

En este caso, el resorte y el amortiguador entre las masas superior e intermedia simulan la suspensión secundaria del coche, el resorte y amortiguador entre las masas intermedia e inferior simulan la suspensión primaria del bogie y el resorte y el amortiguador inferior simulan los elementos situados bajo la rueda. La figura 4.4 muestra el modelo de 3 masas.

4. MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

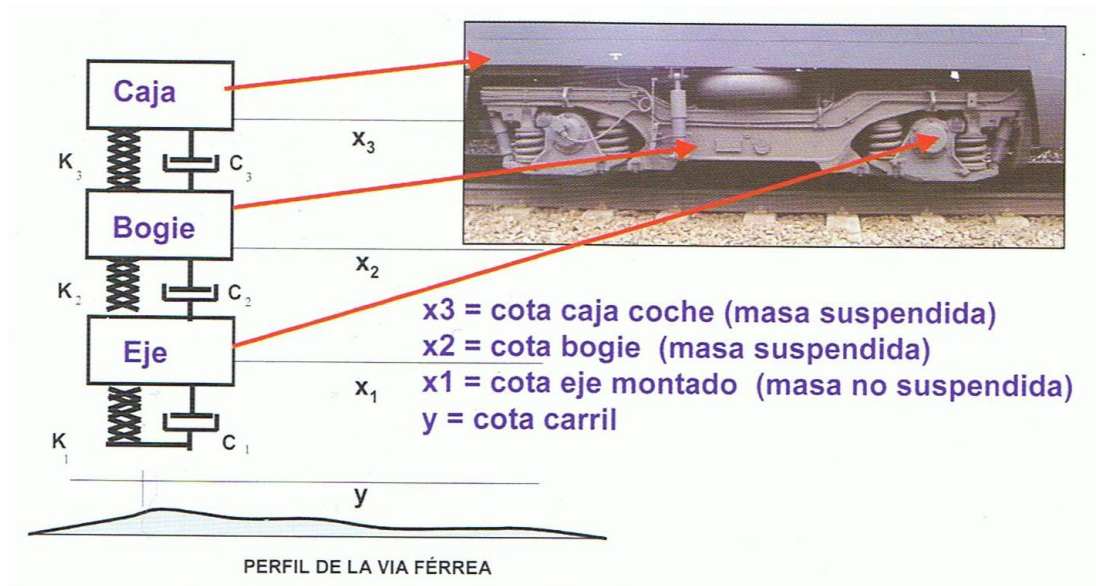


Figura 4.4 – El modelo de tres masas. Eje, bogie y caja del vehículo

4.4- SISTEMA DE CUATRO GRADOS DE LIBERTAD. EL MODELO DE MEDIO BOGIE

El modelo de una dimensión que se ha visto en el apartado anterior tiene una enorme utilidad en ferrocarriles y permite estudiar esfuerzos dinámicos, rigideces de la vía, la influencia de las masas suspendidas y no suspendidas, etc. Sin embargo, es más completo el llamado modelo de medio bogie, ya que aparece la influencia de los dos carriles, y con el que puede estudiarse además el fenómeno del balanceo (figura 4.5).

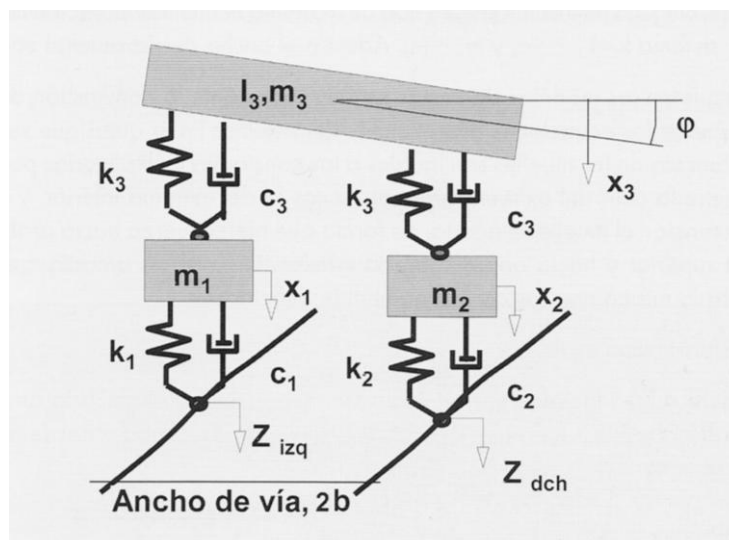


Figura 4.5 – El modelo de medio bogie

4. MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

Integrado el sistema de ecuaciones se conocerán los desplazamientos, velocidades y las aceleraciones verticales y angulares sufridas por el conductor para el modelo de medio bogie, y de aquí se obtendrán también los esfuerzos dinámicos sobre el carril el modelo de medio bogie permite también calcular el giro o balanceo que sufre el viajero, y puede por lo tanto permitir obtener también un indicador de balanceo acumulando los incrementos de giro en valor absoluto y dividiendo por la distancia recorrida, por ejemplo.

4.5- EL MODELO DE BOGIE ENTERO

La integración del modelo de bogie entero permite obtener un indicador de la calidad de una vía más completo que el cuarto de bogie y que el medio bogie. Este indicador es similar al de medio bogie en el sentido de que tiene en cuenta el estado de los dos carriles izquierdo y derecho sobre los que circula el tren, pero además tiene en cuenta los dos ejes del bogie y su distancia o empuje, y por ello representa mejor la calidad de rodadura que los otros modelos, que sólo representan una rueda o un eje.

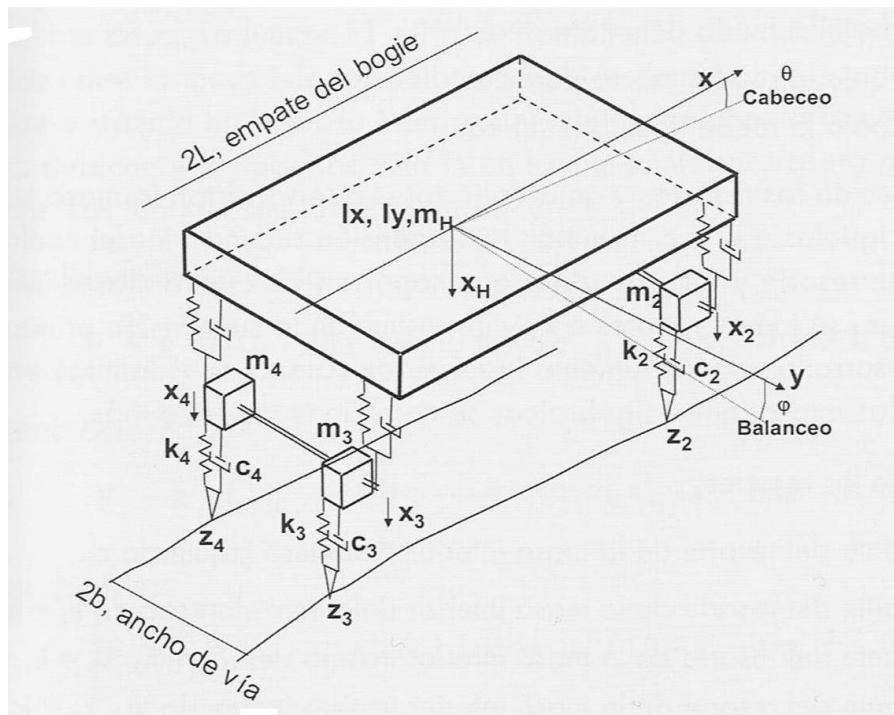


Figura 4.6 – El modelo de vehículo completo

4. MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

El modelo de bogie completo (figura 4.6) permite analizar no sólo la regularidad y el balanceo (giros a derecha e izquierda sufridos por el pasajero) sino también el cabeceo (giros hacia delante y hacia atrás) y puede, por lo tanto, obtenerse un indicador de ambos giros. Además, la simulación de los esfuerzos dinámicos sufridos por la vía refleja con mayor exactitud la circulación real de los trenes, y por lo tanto los resultados de este modelo de bogie entero permiten mejores aproximaciones al estudio de las zonas con disminución dinámica de la adherencia de la rueda o a las zonas en que los esfuerzos dinámicos pueden llegar a dañar peligrosamente la vía.

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

5.1- MODELADO DEL VEHÍCULO FERROVIARIO

En este proyecto, se ha modelado un vehículo ferroviario completo que circula por un tramo recto de vía. El modelo considerado, mostrado en la figura 5.1, consta de la carrocería del vehículo, dos bogies y cuatro ejes, dos por cada bogie. Los ejes y los bogies están conectados a través del sistema de suspensión primaria, formado por resortes y amortiguadores [1]. La carrocería del tren y los bogies están unidos por el sistema de suspensión secundaria. El modelo analítico descrito consta de nueve grados de libertad (movimiento vertical, balanceo y cabeceo de la caja y de los bogies delantero y trasero).

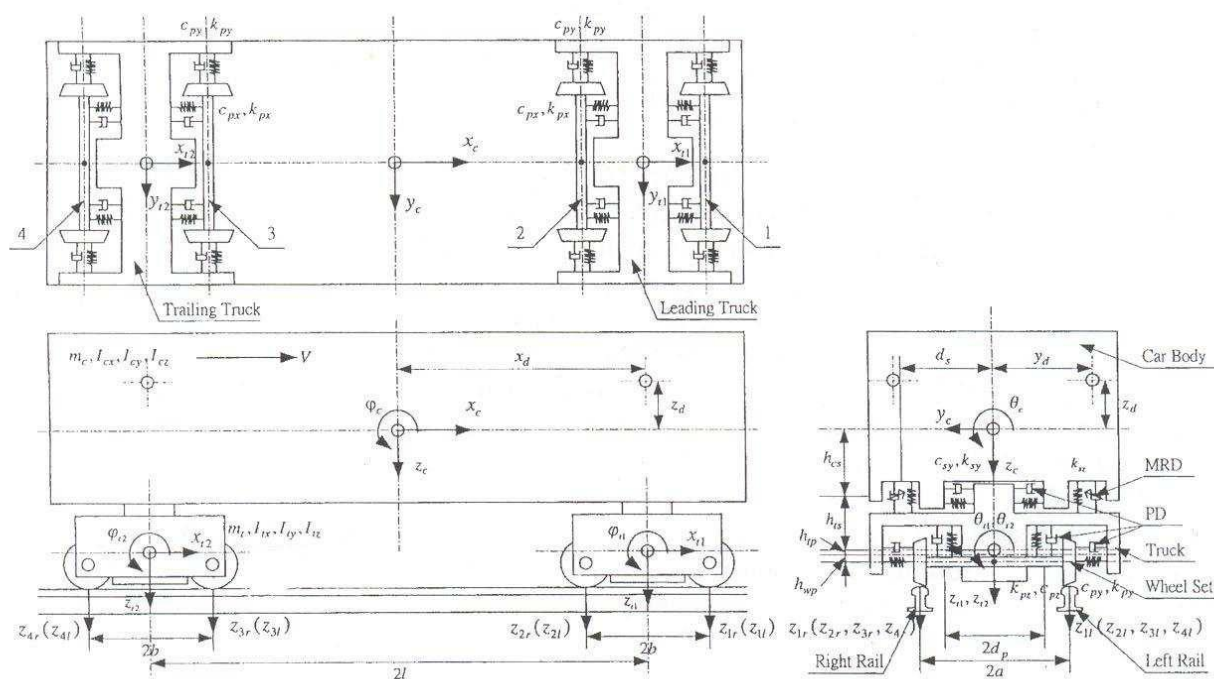


Figura 5.1 – Modelo de vehículo con nueve grados de libertad.

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del vehículo dotado del sistema de suspensión descrito en el apartado anterior pueden ser derivadas usando las leyes de Newton [1].

Las ecuaciones que describen el movimiento de la carrocería ($car = c$) pueden expresarse como se describe a continuación:

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

$$m_c \ddot{z}_c = F_{szlr} + F_{szll} + F_{sztr} + F_{sztl} + f_{szlr} + f_{szll} + f_{sztr} + f_{sztl} \quad (1)$$

$$I_{cy} \ddot{\phi}_c = (F_{sxlr} + F_{sxll})h_{cs} + (F_{sxtr} + F_{sxtl})h_{cs} - (F_{szlr} + F_{szll})l + (F_{sztr} + F_{sztl})l - (f_{szlr} + f_{szll})l + (f_{sztr} + f_{sztl})l \quad (2)$$

$$I_{cx} \ddot{\theta}_c = -(F_{sytr} + F_{sytl})h_{cs} - (F_{sytr} + F_{sytl})h_{cs} + (F_{szlr} + F_{sztr})d_s - (F_{szll} + F_{sztl})d_s - (f_{szlr} + f_{sztr})d_s + (f_{szll} + f_{sztl})d_s \quad (3)$$

donde z_c es el movimiento vertical, θ_c el balanceo y ϕ_c el cabeceo de la carrocería.

Las ecuaciones que describen el movimiento del bogie principal (*leading truck* = t_1) pueden expresarse como se describe a continuación:

$$m_t \ddot{z}_{t1} = -(F_{szlr} + F_{szll}) + (F_{pz1r} + F_{pz2r}) + (F_{pz1l} + F_{pz2l}) - (f_{szlr} + f_{szll}) \quad (4)$$

$$I_{ty} \ddot{\phi}_{t1} = (F_{sxlr} + F_{sxll})h_{ts} + (F_{px1r} + F_{px1l})h_{tp} + (F_{px2r} + F_{px2l})h_{tp} - (F_{pz1r} + F_{pz1l})b + (F_{pz2r} + F_{pz2l})b \quad (5)$$

$$I_{tx} \ddot{\theta}_{t1} = -(F_{sytr} + F_{sytl})h_{ts} - (F_{szlr} - F_{szll})d_s - (F_{py1r} + F_{py2r})h_{tp} - (F_{py1l} + F_{py2l})h_{tp} + (F_{pz1r} + F_{pz2r})d_p - (F_{pz1l} + F_{pz2l})d_p - (f_{szlr} - f_{szll})d_s \quad (6)$$

donde z_{t1} el movimiento vertical, θ_{t1} el balanceo y ϕ_{t1} el cabeceo del bogie principal.

Las ecuaciones que describen el movimiento del bogie secundario (*training truck* = t_2) pueden expresarse como se describe a continuación:

$$m_t \ddot{z}_{t2} = -(F_{sztr} + F_{sztl}) + (F_{pz3r} + F_{pz3l}) + (F_{pz4r} + F_{pz4l}) - (f_{sztr} + f_{sztl}) \quad (7)$$

$$I_{ty} \ddot{\phi}_{t2} = (F_{sxtr} + F_{sxtl})h_{ts} - (F_{px3r} + F_{px3l})h_{tp} + (F_{px4r} + F_{px4l})h_{tp} - (F_{pz3r} + F_{pz3l})b + (F_{pz4r} + F_{pz4l})b \quad (8)$$

$$I_{tx} \ddot{\theta}_{t2} = -(F_{sytr} + F_{sytl})h_{ts} - (F_{sztr} - F_{sztl})d_s - (F_{py3r} + F_{py4r})h_{tp} - (F_{py3l} + F_{py4l})h_{tp} + (F_{pz3r} + F_{pz4r})d_p - (F_{pz3l} + F_{pz4l})d_p - (f_{sztr} - f_{sztl})d_s \quad (9)$$

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

donde z_{t2} el movimiento vertical, θ_{t2} el balanceo y φ_{t2} el cabeceo del bogie secundario.

A continuación se muestran los valores de los diferentes términos de F que aparecen en las ecuaciones (1) a (9), las cuales representan las fuerzas de la suspensión producidas por los sistemas de suspensión primaria y secundaria:

$$F_{sxlr} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t1}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t1}); \quad (10)$$

$$F_{sxll} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t1}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t1}); \quad (11)$$

$$F_{sxtr} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t2}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t2}); \quad (12)$$

$$F_{sxtl} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t2}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t2}) \quad (13)$$

$$F_{sytr} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t1}) + c_{sx}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t1}); \quad (14)$$

$$F_{syll} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t1}) + c_{sx}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t1}); \quad (15)$$

$$F_{sytr} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t2}) + c_{sx}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t2}); \quad (16)$$

$$F_{sytl} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t2}) + c_{sx}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t2}) \quad (17)$$

$$F_{szlr} = -k_{sz}[z_c - l\varphi_c - z_{t1} + d_s(\theta_c - \theta_{t1})] - c_{sz}[\dot{z}_c - l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t1} + d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1})]; \quad (18)$$

$$F_{szll} = -k_{sz}[z_c - l\varphi_c - z_{t1} + d_s(\theta_c - \theta_{t1})] - c_{sz}[\dot{z}_c - l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t1} + d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1})]; \quad (19)$$

$$F_{sztr} = -k_{sz}[z_c - l\varphi_c - z_{t2} + d_s(\theta_c - \theta_{t2})] - c_{sz}[\dot{z}_c - l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t2} + d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t2})]; \quad (20)$$

$$F_{sztl} = -k_{sz}[z_c - l\varphi_c - z_{t2} + d_s(\theta_c - \theta_{t2})] - c_{sz}[\dot{z}_c - l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t2} + d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t2})] \quad (21)$$

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

$$F_{px1r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1}; \quad (22)$$

$$F_{px1l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1}; \quad (23)$$

$$F_{px2r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1}; \quad (24)$$

$$F_{px2l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1}; \quad (25)$$

$$F_{px3r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2}; \quad (26)$$

$$F_{px3l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2}; \quad (27)$$

$$F_{px4r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2}; \quad (28)$$

$$F_{px4l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2}; \quad (29)$$

$$F_{py1r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} - c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1}; \quad (30)$$

$$F_{py1l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} - c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1}; \quad (31)$$

$$F_{py2r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} - c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1}; \quad (32)$$

$$F_{py2l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} - c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1}; \quad (33)$$

$$F_{py3r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} - c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2}; \quad (34)$$

$$F_{py3l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} - c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2}; \quad (35)$$

$$F_{py4r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} - c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2}; \quad (36)$$

$$F_{py4l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} - c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2}; \quad (37)$$

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

$$F_{pz1r} = -k_{pz}(z_{t1} - b\varphi_{t1} + d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a}z_{1r}) - c_{pz}(\dot{z}_{t1} - b\dot{\varphi}_{t1} + d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{1r}) \quad (38)$$

$$F_{pz1l} = -k_{pz}(z_{t1} - b\varphi_{t1} - d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a}z_{1l}) - c_{pz}(\dot{z}_{t1} - b\dot{\varphi}_{t1} - d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{1l}) \quad (39)$$

$$F_{pz2r} = -k_{pz}(z_{t1} + b\varphi_{t1} + d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a}z_{2r}) - c_{pz}(\dot{z}_{t1} + b\dot{\varphi}_{t1} + d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{2r}) \quad (40)$$

$$F_{pz2l} = -k_{pz}(z_{t1} + b\varphi_{t1} - d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a}z_{2l}) - c_{pz}(\dot{z}_{t1} + b\dot{\varphi}_{t1} - d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{2l}) \quad (41)$$

$$F_{pz3r} = -k_{pz}(z_{t2} - b\varphi_{t2} + d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a}z_{3r}) - c_{pz}(\dot{z}_{t2} - b\dot{\varphi}_{t2} + d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{3r}) \quad (42)$$

$$F_{pz3l} = -k_{pz}(z_{t2} - b\varphi_{t2} - d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a}z_{3l}) - c_{pz}(\dot{z}_{t2} - b\dot{\varphi}_{t2} - d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{3l}) \quad (43)$$

$$F_{pz4r} = -k_{pz}(z_{t2} + b\varphi_{t2} + d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a}z_{4r}) - c_{pz}(\dot{z}_{t2} + b\dot{\varphi}_{t2} + d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{4r}) \quad (44)$$

$$F_{pz4l} = -k_{pz}(z_{t2} + b\varphi_{t2} - d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a}z_{4l}) - c_{pz}(\dot{z}_{t2} + b\dot{\varphi}_{t2} - d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{4l}) \quad (45)$$

5.1.1-IRREGULARIDADES DE LA VÍA

Las irregularidades de la vía son esencialmente debidas a defectos de construcción de los raíles, al desgaste y a un posible mal mantenimiento. Estas irregularidades modifican de forma significativa el movimiento del tren y causan un importante impacto dinámico.

5.1.1.1-IRREGULARIDADES PERIÓDICAS

Si la excitación vertical del eje frontal (eje 1) del bogie primario está representada por z_{1r} y z_{2r} , las irregularidades periódicas pueden ser descritas de la forma siguiente [1]:

$$\begin{bmatrix} z_{1r}(t) \\ z_{1l}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4A}{\pi} \left[\frac{1}{3} \cos \Omega x - \frac{1}{15} \cos 2\Omega x + \frac{1}{35} \cos 3\Omega x \right] \\ \frac{4A}{\pi} \left[\frac{1}{3} \cos \Omega x - \frac{1}{15} \cos 2\Omega x + \frac{1}{35} \cos 3\Omega x \right] \end{bmatrix} \quad (46)$$

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

donde el factor escalar de las irregularidades periódicas de la pista es $A = 0.0254$ m, la frecuencia espacial es $\Omega = 2\pi/L$ [rad/s], la longitud del raíl es $L = 25$ m y la posición espacial sobre el raíl es $x = V \cdot t$ [m].

Para hallar las excitaciones en los otros ejes se utilizan las expresiones siguientes:

$$\begin{bmatrix} z_{2r}(t) \\ z_{2l}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{1r}(t - \tau_1) \\ z_{1l}(t - \tau_1) \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} z_{3r}(t) \\ z_{3l}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{1r}(t - \tau_2) \\ z_{1l}(t - \tau_2) \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\begin{bmatrix} z_{4r}(t) \\ z_{4l}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{1r}(t - \tau_3) \\ z_{1l}(t - \tau_3) \end{bmatrix} \quad (49)$$

donde τ_1 , τ_2 y τ_3 son los desfases de tiempo aplicados en cada uno de los ejes. Estos se definen como se describe a continuación:

$$\tau_1 = 2 \cdot b / V$$

$$\tau_2 = 2 \cdot l / V$$

$$\tau_3 = 2 \cdot (b+l) / V$$

5.1.1.2-IRREGULARIDADES ALEATORIAS

El perfil de la superficie de las vías es modelado por un proceso Gaussiano aleatorio y estacionario, caracterizado por una densidad espectral de energía que permite describir la calidad de la superficie. Se ha utilizado un modelo de este tipo para cada raíl, para así obtener perfiles diferentes a ambos lados de la vía. Las irregularidades aleatorias en el raíl son expresadas de la manera siguiente [11]:

$$r(x) = \sum_{k=1}^N \left(4A_r \left(\frac{2\pi k}{L_c \omega_{so}} \right)^{-2} \frac{2\pi}{L_c} \right)^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_{sk}x + \varphi_k) \quad (50)$$

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

donde el número de puntos de discretización es $N = 180$, el coeficiente de rugosidad espectral que caracteriza el estado de la vía es $A_r = 10^{-6} \text{ m}^3/\text{ciclo}$, que indica que el raíl es de una condición aceptable; la pulsación de la discontinuidad es $\omega_{so} = 1/2\pi \text{ ciclos/m}$ y la longitud de onda es $1/\omega_{sk} = L_c/2\pi k$. En la expresión de la longitud de onda $L_c = 2L \text{ [m]}$, donde L es la longitud del raíl ($L=25 \text{ m}$); $x \text{ [m]}$ es la posición espacial sobre el raíl y φ_k un número aleatorio variable entre 0 y 2π .

5.1.2-ACELERACIÓN DE LOS PASAJEROS

Para evaluar la calidad de la marcha, se han elegido cuatro posiciones dentro del vehículo que se corresponden con cuatro asientos para los usuarios [1]. Las dos primeras se encuentran en la parte delantera del vagón; en los puntos (x_d, y_d, z_d) y $(x_d, -y_d, z_d)$. Las otras dos se encuentran en la parte trasera, en los puntos $(-x_d, y_d, z_d)$ y $(-x_d, -y_d, z_d)$:

$$\ddot{z}_{fr}(x_d, y_d, z_d) = \ddot{z}_c - x_d \ddot{\varphi}_c + y_d \ddot{\theta}_c \quad (50)$$

$$\ddot{z}_{fl}(x_d, y_d, z_d) = \ddot{z}_c - x_d \ddot{\varphi}_c - y_d \ddot{\theta}_c \quad (51)$$

$$\ddot{z}_{rr}(x_d, y_d, z_d) = \ddot{z}_c + x_d \ddot{\varphi}_c + y_d \ddot{\theta}_c \quad (52)$$

$$\ddot{z}_{rl}(x_d, y_d, z_d) = \ddot{z}_c + x_d \ddot{\varphi}_c - y_d \ddot{\theta}_c \quad (53)$$

donde:

$$x_d = 9 \text{ m}$$

$$y_d = 0.75 \text{ m}$$

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

5.1.3- PARÁMETROS DEL VEHÍCULO FERROVIARIO

Los parámetros que definen el vehículo ferroviario se muestran en la tabla 5.1 [1].

Tabla 5.1- Parámetros del vehículo ferroviario

$V = 55.56 \text{ m/s}$	$k_{py} = 3.25 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$c_{sz} = 8.00 \cdot 10^4 \text{ N}\cdot\text{s/m}$
$m_c = 3.96 \cdot 10^4 \text{ kg}$	$k_{pz} = 7.00 \cdot 10^5 \text{ N/m}$	$h_{ts} = 0.217 \text{ m}$
$m_t = 3.25 \cdot 10^3 \text{ kg}$	$c_{px} = 0$	$h_{cs} = 1.207 \text{ m}$
$I_{cx} = 8.85 \cdot 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$c_{py} = 0$	$h_{tp} = -0.452 \text{ m}$
$I_{cy} = 2.46 \cdot 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$c_{pz} = 1.50 \cdot 10^4 \text{ N}\cdot\text{s/m}$	$h_{wp} = 0.180 \text{ m}$
$I_{cz} = 2.505 \cdot 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$k_{sx} = 1.5 \cdot 10^5 \text{ N/m}$	$l = 9.00 \text{ m}$
$I_{tx} = 3.06 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$k_{sy} = 1.50 \cdot 10^5 \text{ N/m}$	$a = 0.7465 \text{ m}$
$I_{ty} = 3.02 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$k_{sz} = 2.90 \cdot 10^5 \text{ N/m}$	$d_s = 1.00 \text{ m}$
$I_{tz} = 4.27 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$c_{sx} = 0$	$b = 1.25 \text{ m}$
$k_{px} = 4.00 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$c_{sy} = 5.00 \cdot 10^4 \text{ N}\cdot\text{s/m}$	$d_p = 1.00 \text{ m}$

5.2- CONDICIONES DE LA SIMULACIÓN

En este apartado se describen los modelos del vehículo ferroviario y las condiciones que presentan las diferentes simulaciones que se desarrollan en este proyecto. El estudio de este proyecto se realiza con la aplicación *Simulink* de *Matlab*.

En este proyecto se realiza un estudio del comportamiento del vehículo ferroviario con dos sistemas de suspensión diferentes. En primer lugar, se desarrolla con un sistema de suspensión pasiva y a continuación con un sistema de suspensión semiactiva gobernado por un controlador borroso. Además se han realizado simulaciones para un vehículo ferroviario que circula por un tramo de vía recta con un perfil de irregularidades periódicas y con un perfil de irregularidades aleatorias. La obtención de estos perfiles se ha descrito en el apartado 5.1.1. En la figura 5.2 se muestra el perfil periódico de la vía, que es idéntico para los dos raíles y en las figuras 5.3 y 5.4 los perfiles aleatorios generados para el raíl derecho e izquierdo de la vía.

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

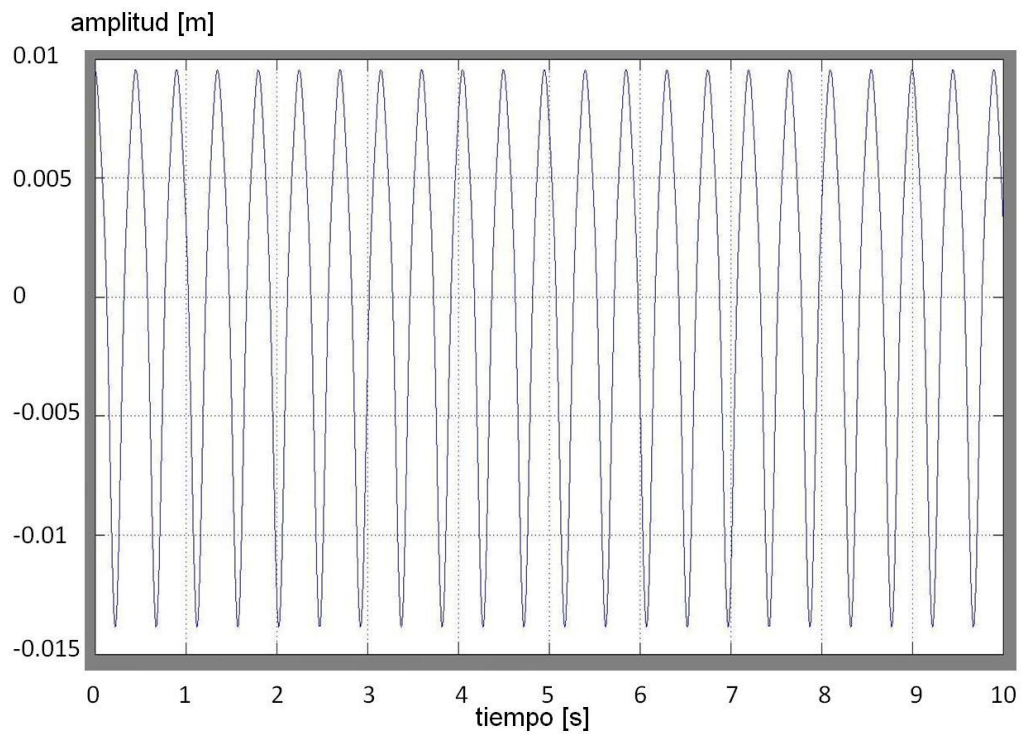


Figura 5.2 – Perfil de la vía con irregularidades periódicas

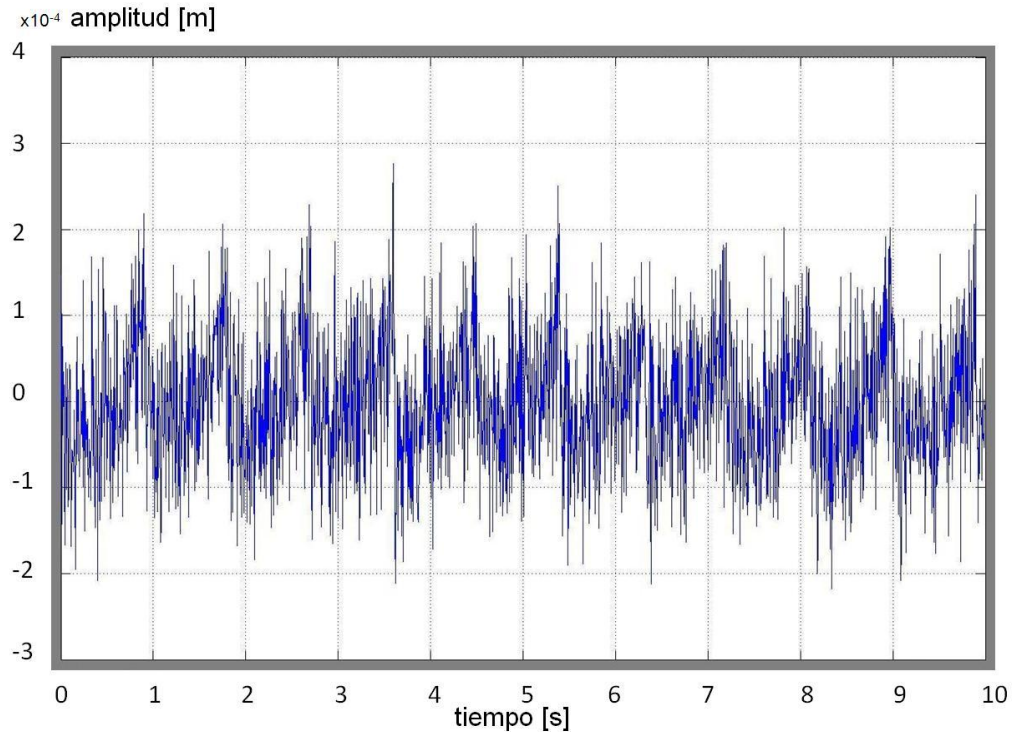


Figura 5.3 – Perfil del raíl derecho de la vía con irregularidades periódicas

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

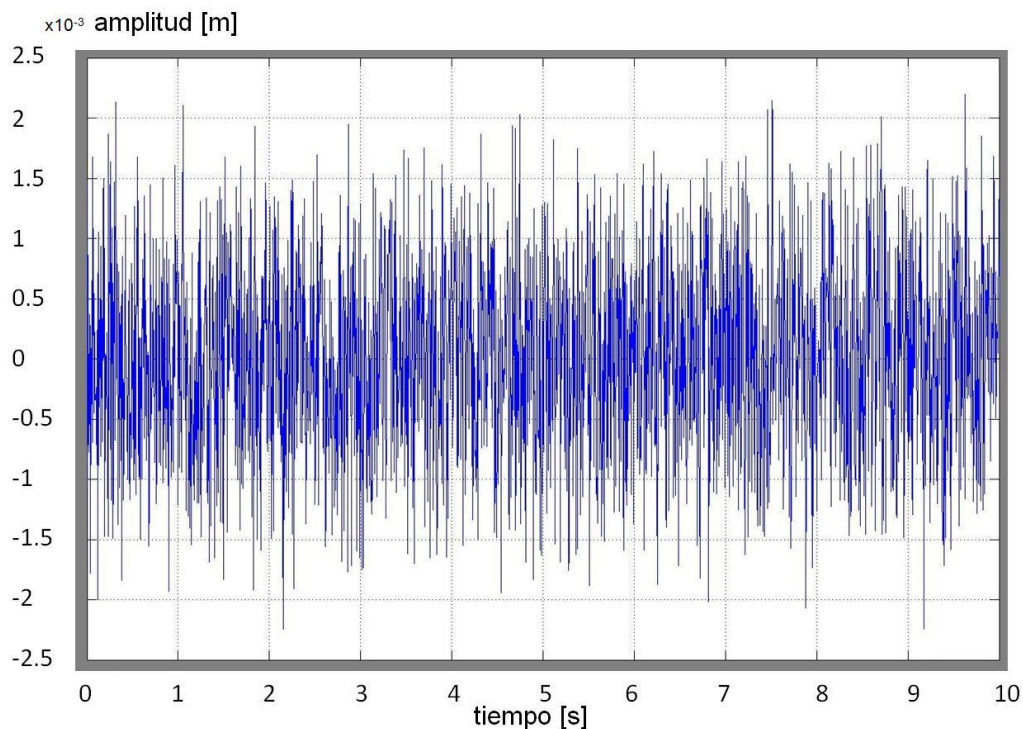


Figura 5.4 – Perfil del raíl izquierdo de la vía con irregularidades periódicas

El modelo de vehículo ferroviario con suspensión pasiva que circula por un tramo de vía con un perfil de irregularidades periódicas se muestra en la figura 5.5. Este modelo está compuesto por veinte entradas, de las cuales ocho se corresponden con las excitaciones verticales producidas por el perfil de la vía, ocho con sus derivadas y cuatro con las fuerzas que ejercen los amortiguadores del sistema de suspensión semiactiva, las cuales en este modelo tienen un valor cero, por ser el sistema de suspensión pasiva. Por otro lado, está compuesto de seis salidas, que se corresponden con movimiento vertical z_c , el balanceo θ_c , el cabeceo de la carrocería ϕ_c y sus respectivas derivadas segundas, que son las aceleraciones en los tres grados de libertad de la caja del vehículo. Con estas salidas, se obtienen los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones en cuatro posiciones dentro del vehículo que se corresponden con cuatro asientos para los usuarios, tal y como se describió en el apartado 5.1.2, las cuales serán las entradas del controlador borroso.

El modelo de vehículo ferroviario con suspensión pasiva que circula por un tramo de vía con un perfil de irregularidades aleatorias se muestra en la figura 5.6. Este modelo es similar al que circula por un perfil de vía con irregularidades periódicas pero las entradas correspondientes a las excitaciones verticales son diferentes, tal y como se describen en el apartado 5.1.1.2.

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

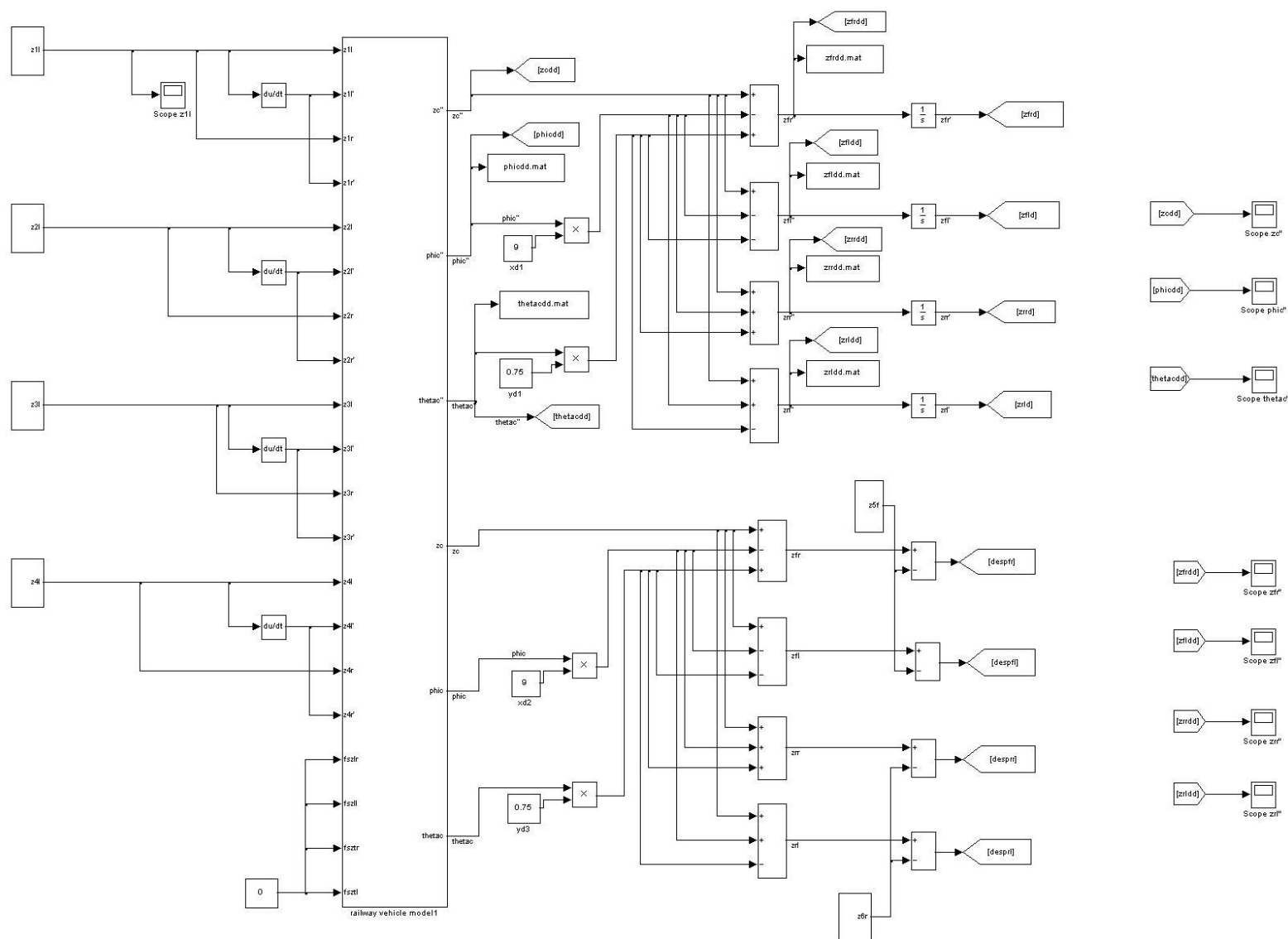


Figura 5.5 – Modelo de vehículo con suspensión pasiva para vía con irregularidades periódicas

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

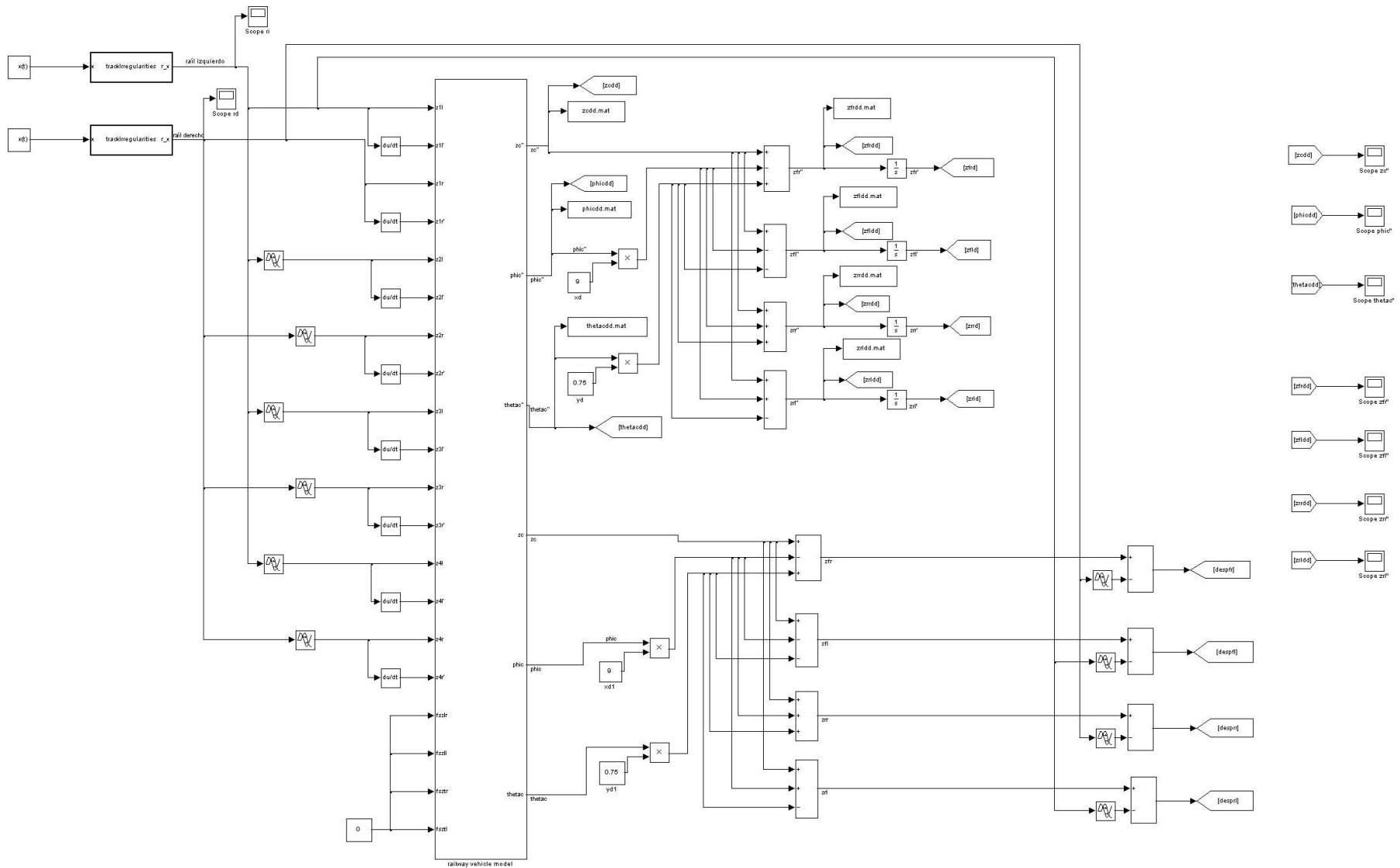


Figura 5.6 – Modelo de vehículo con suspensión pasiva para vía con irregularidades aleatorias

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El modelo de vehículo ferroviario que se describe a continuación se corresponde con el que dispone de un sistema de suspensión semiactiva gobernado por un sistema de control borroso. Este modelo es más complicado ya que el número de entradas al sistema aumenta en cuatro. Dichas entradas representan las fuerzas que ejercen los amortiguadores de la suspensión semiactiva para reducir las vibraciones. Además, el modelo necesita un sistema de control que gobierne el comportamiento de las fuerzas de los amortiguadores que entran en el sistema. Para ello se necesita realimentar el sistema mediante un lazo cerrado. Estas entradas llegan al controlador de lógica borrosa procesándolos y proporcionando una salida según una serie de reglas o condiciones que se han definido previamente. La salida del controlador es la fuerza que ejercen los amortiguadores de la suspensión semiactiva, la cual es a su vez la entrada al sistema de ecuaciones que componen el modelo (figura 5.7). El esquema de este modelo para tramo de vía con irregularidades periódicas implementado en *Simulink* se muestra en la figura 5.8, el modelo para el tramo de vía con irregularidades aleatorias se muestra en la figura 5.9.

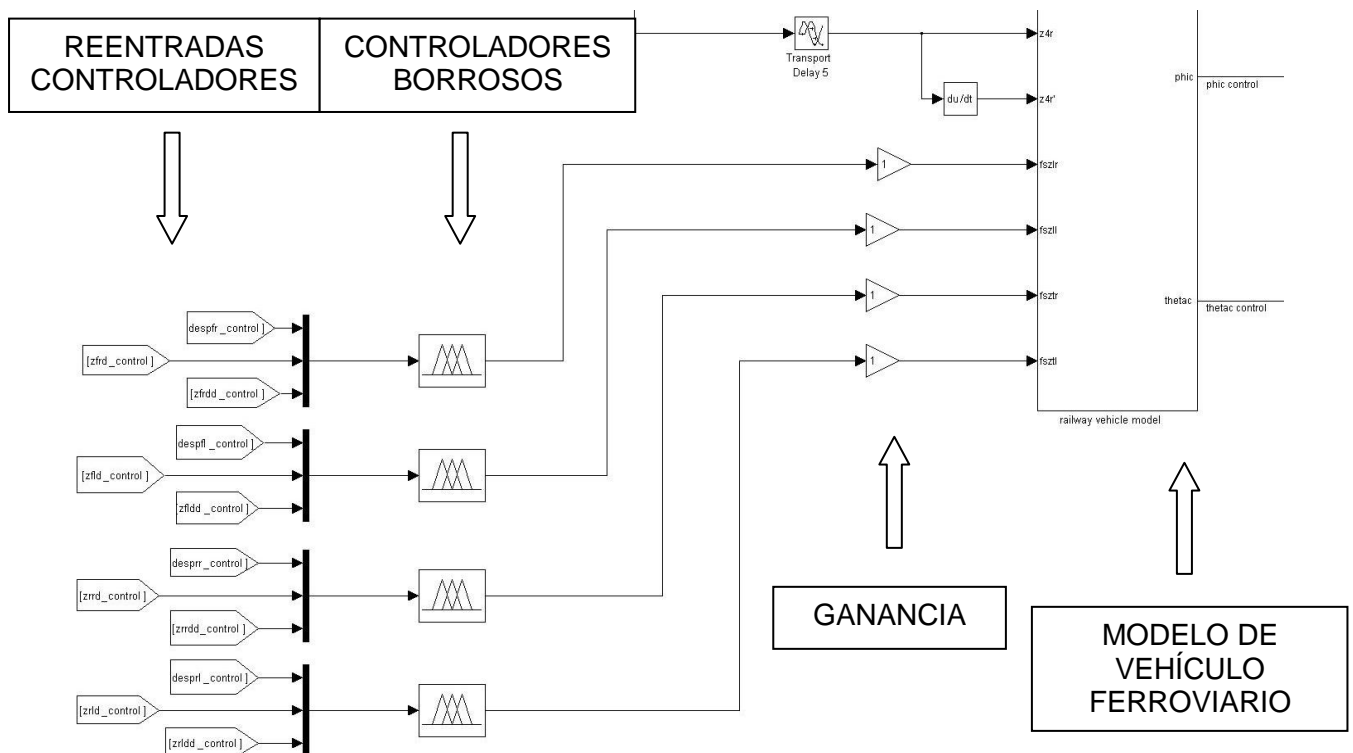


Figura 5.7 – Detalle del sistema de control en el modelo

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

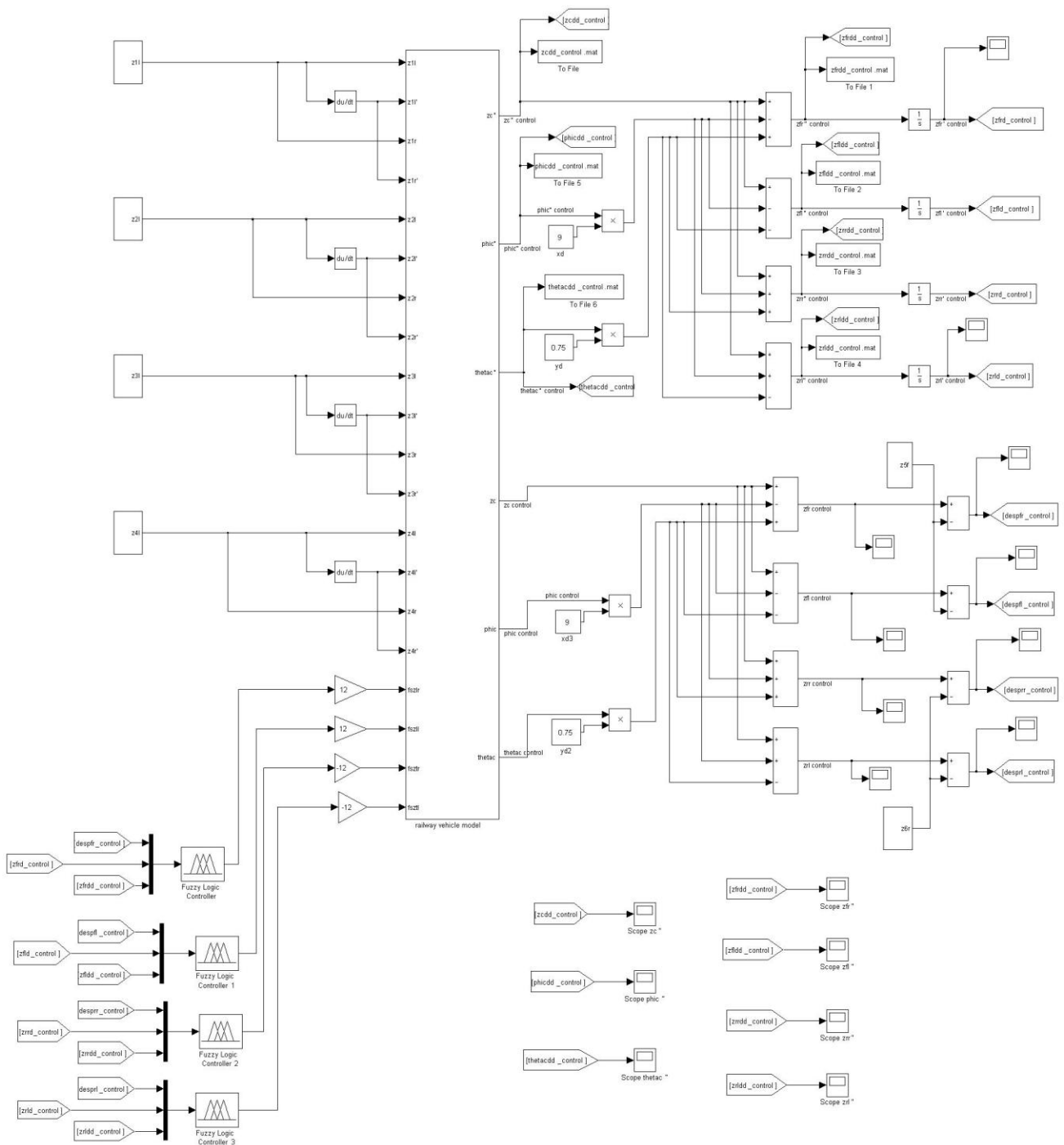


Figura 5.8 – Modelo de vehículo con suspensión gobernada por controlador para vía con irregularidades periódicas

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

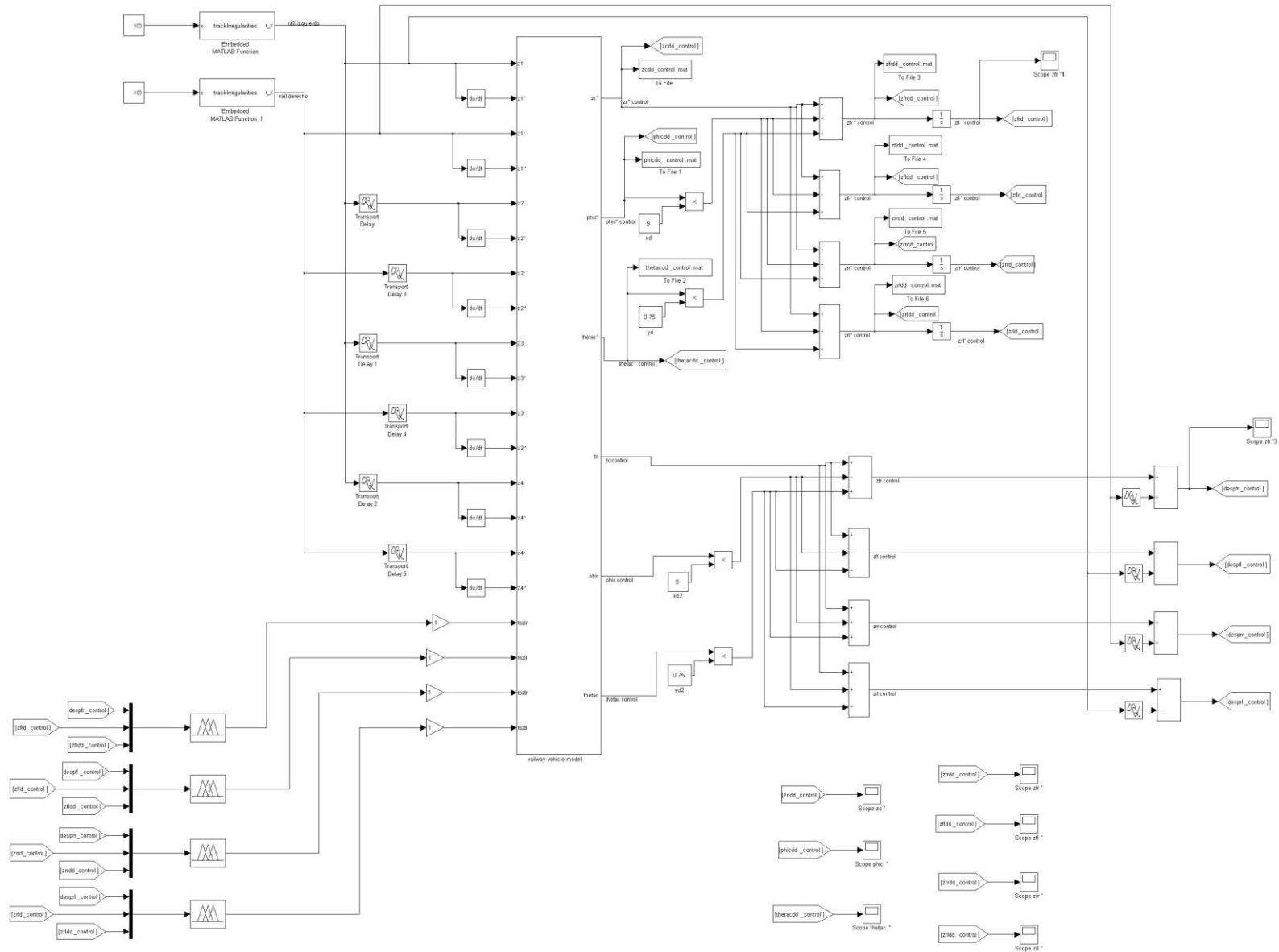


Figura 5.9 – Modelo de vehículo con suspensión gobernada por controlador para vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Las reglas y condiciones que utiliza el controlador borroso y el proceso que se sigue para su obtención se describen a continuación. Se han elegido tres variables de entrada para el controlador: desplazamiento, velocidad y aceleración en las cuatro posiciones descritas en el apartado 5.1.2. El desplazamiento de cada posición es la diferencia entre el movimiento vertical del asiento y la longitud de la perturbación que tiene la vía en cada instante. Una vez que se han obtenido los resultados para el modelo de vehículo con sistema de suspensión pasiva se conocen los rangos de las aceleraciones de los pasajeros, parámetro utilizado para evaluar la calidad de la marcha, las velocidades y sus desplazamientos para este tipo de modelo. Los rangos de las variables de entrada se han elegido según los resultados analizados obtenidos del modelo con sistema de suspensión pasiva. La variable de salida del controlador es la fuerza que ejercen los amortiguadores de la suspensión semiactiva y se ha establecido un rango de actuación de ± 7000 N [7]. En todos los casos, por si el valor de entrada o de salida no abarca los posibles valores que se puedan dar, los extremos se escogen con forma trapezoidal. El esquema del controlador borroso se muestra en la figura 5.10 y los rangos de las funciones de pertenencia en las figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15. Como método de defuzzificación se ha utilizado Mandani, que está basado en la elección del valor de salida por centro de gravedad. Este método consiste en generar la unión de todas las salidas recortadas, derivadas de una de las reglas y encontrar el centro de gravedad del área que compone esta unión, que será la entrada del controlador.

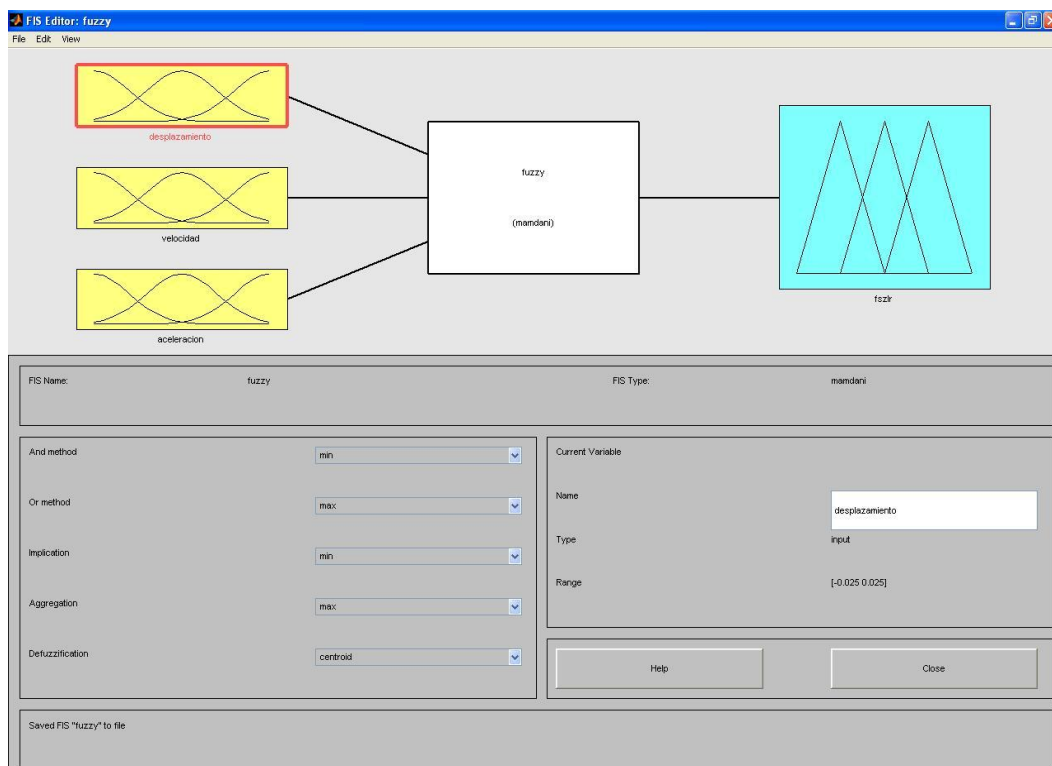


Figura 5.10 – Esquema del controlador borroso en *Simulink*

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

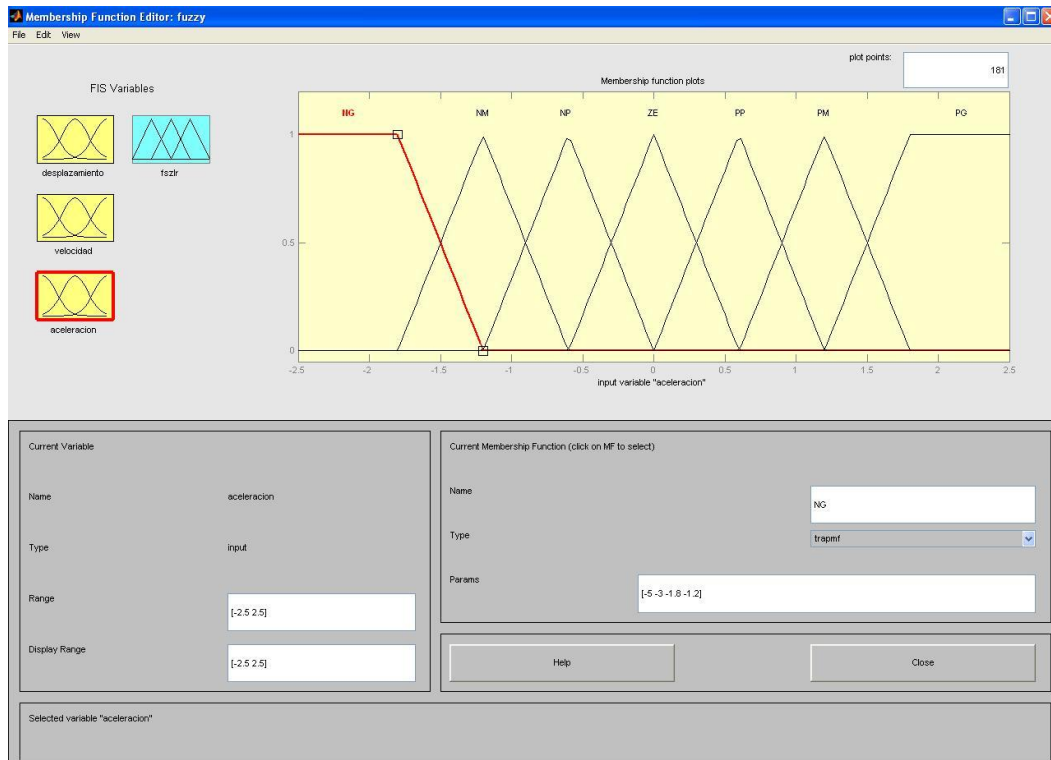


Figura 5.11 – Estructura de la variable de entrada “aceleración” para el modelo con irregularidades periódicas en *Simulink*

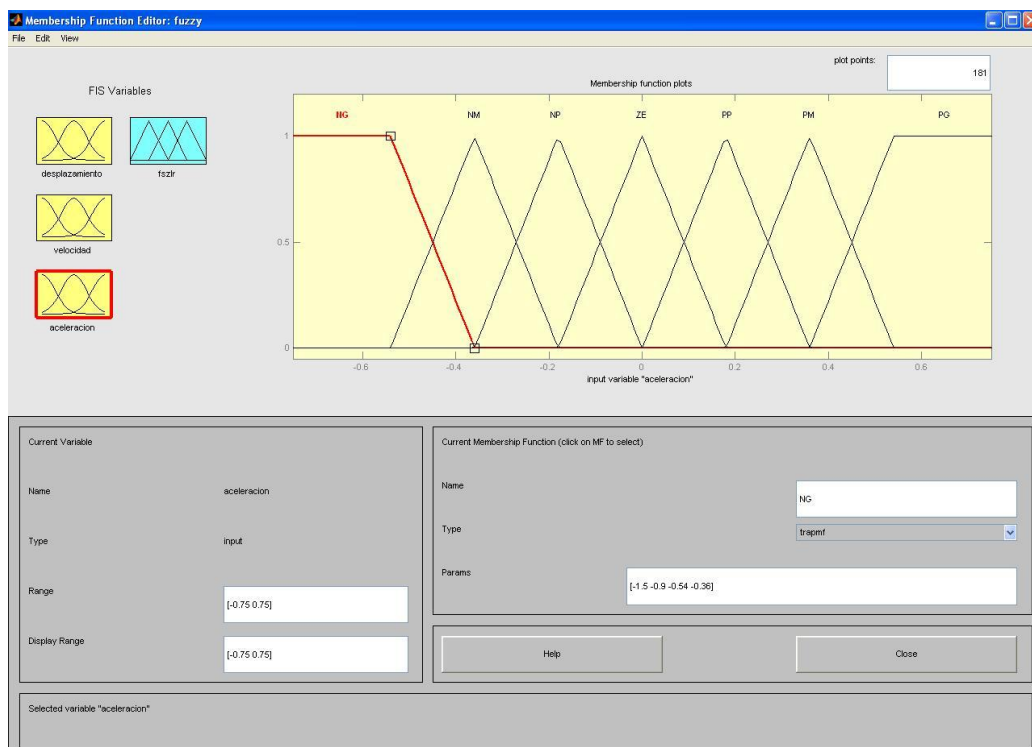


Figura 5.12 – Estructura de la variable de entrada “aceleración” para el modelo con irregularidades aleatorias en *Simulink*

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

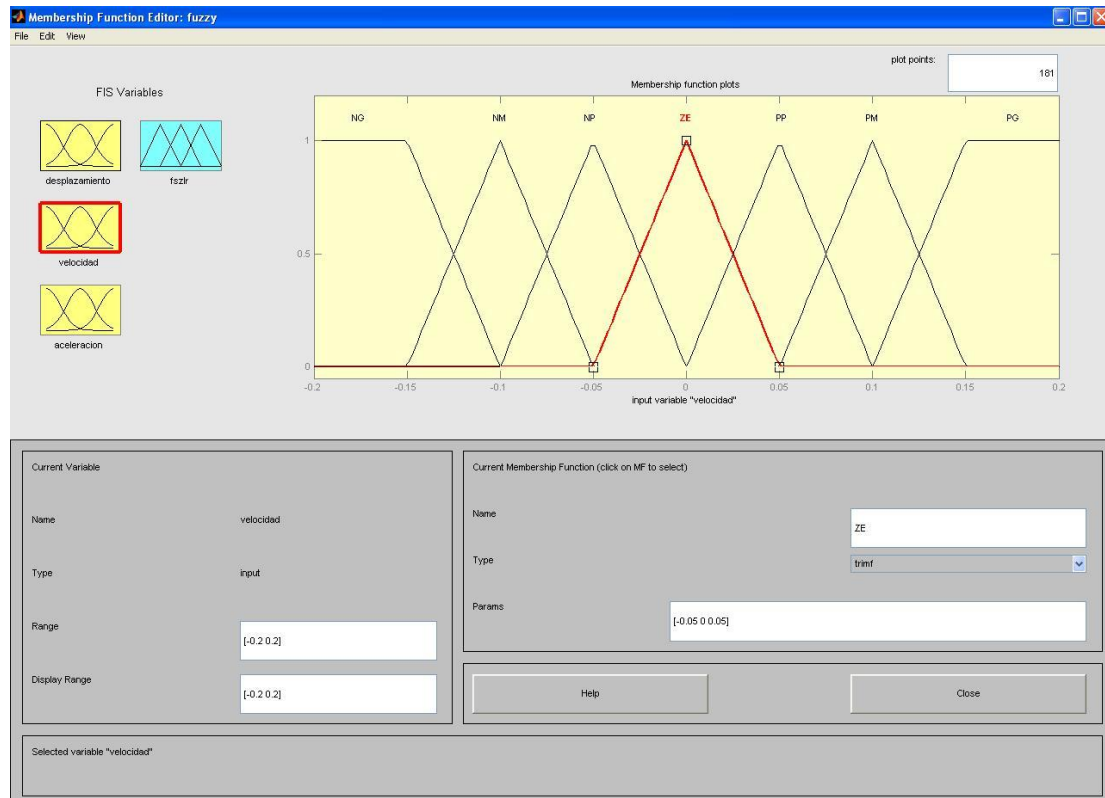


Figura 5.13 – Estructura de la variable de entrada “velocidad” para el modelo en *Simulink*

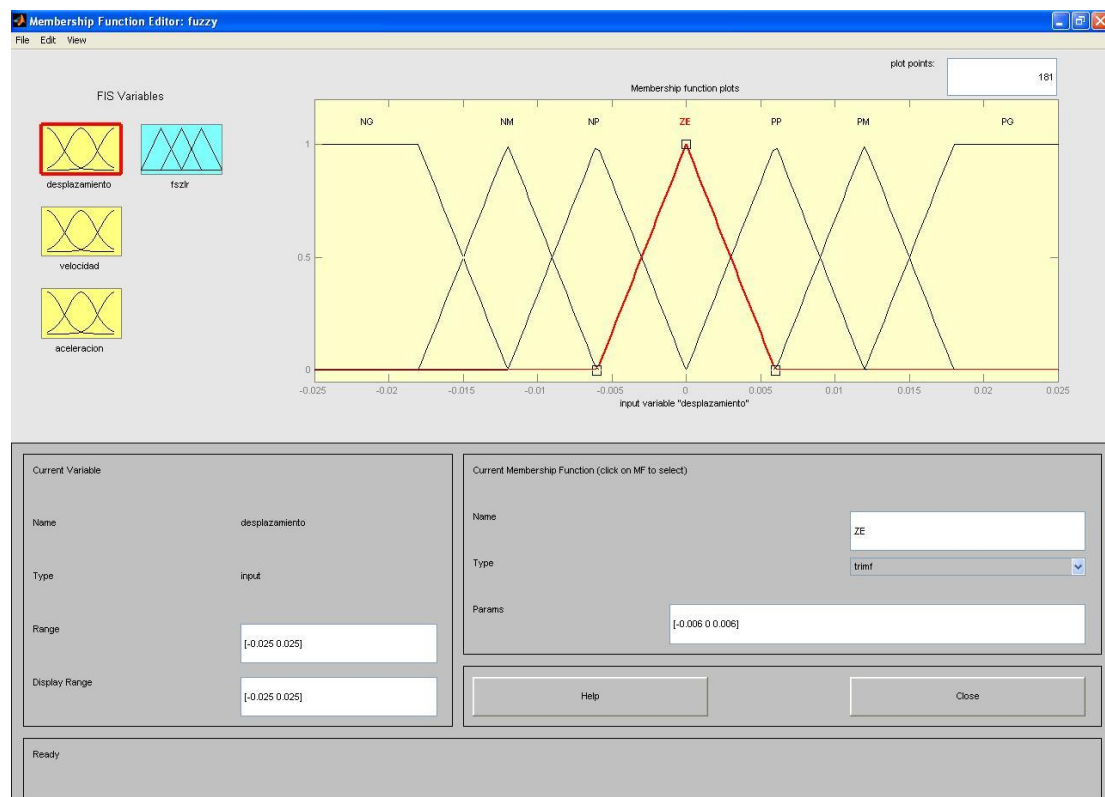


Figura 5.14 – Estructura de la variable de entrada “desplazamiento” para el modelo en *Simulink*

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

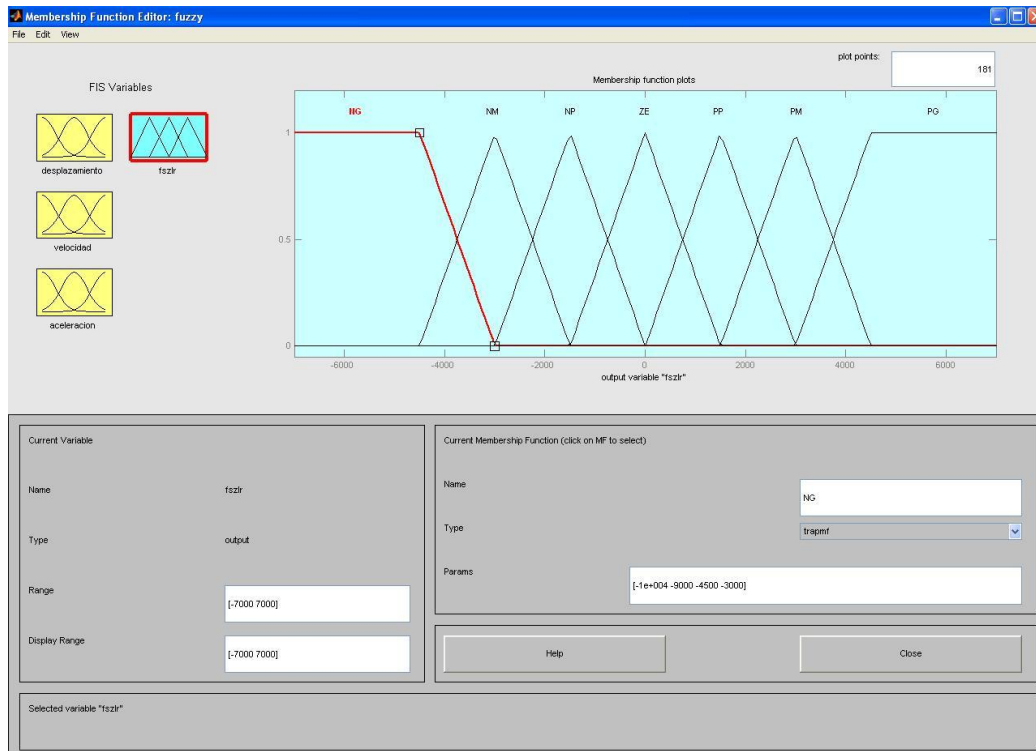


Figura 5.15 – Estructura de la variable de salida “fuerza” para el modelo en *Simulink*

Los términos lingüísticos y la nomenclatura utilizada en el controlador de lógica borrosa se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2- Términos lingüísticos utilizados por el controlador

SIGLAS	SIGNIFICADO
NG	Negativo grande
NM	Negativo mediano
NP	Negativo pequeño
ZE	Cero
PP	Positivo pequeño
PM	Positivo mediano
PG	Positivo grande

El criterio de signos está impuesto suponiendo que los desplazamientos son hacia arriba y los negativos hacia abajo. La fuerza es positiva y sigue el criterio de las ecuaciones (1) - (9).

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se han desarrollado dos conjuntos de reglas para este modelo, siendo las condiciones de simulación iguales en todas las simulaciones. Debido a que se tienen siete términos lingüísticos y tres entradas, el número de combinaciones posibles para obtener el valor de la salida es de 343. Las reglas asociadas al primer conjunto se muestran en la tabla 8.1 y las que están asociadas al segundo en la tabla 8.2, recogidas en el anexo. La estructura de las reglas que rigen los controladores es la siguiente:

IF “desplazamiento” IS valor AND “velocidad” IS valor AND “aceleración” IS valor THEN “fuerza” IS valor

Una vez que se han implementado los modelos, se ha utilizado un proceso de “prueba y error” para tratar de obtener valores óptimos que mejoren el sistema de suspensión pasiva mediante el proceso de control. Para ello, se modifica la ganancia en la salida del controlador con el fin de incrementar la fuerza que ejercen los amortiguadores de la suspensión semiactiva.

5.3- RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones. Se realizaron varias simulaciones y aplicando el método de “prueba y error”, se han escogido las que daban un mejor resultado. En todas las figuras aparece el resultado para el modelo con suspensión pasiva y el modelo con suspensión semiactiva, para así poder facilitar su comparación.

5.3.1- RESULTADOS PARA MODELO DE VEHÍCULO FERROVIARIO QUE CIRCULA POR UNA VÍA CON UN PERFIL DE IRREGULARIDADES PERIÓDICAS

A continuación, se muestran los resultados de simulación obtenidos para el segundo conjunto de reglas (tabla 8.2) y una ganancia de +12 para los asientos delanteros y -12 para los traseros debido a que ha mostrado obtener mejores resultados que con el primer conjunto de reglas propuesto (tabla 8.1) o utilizando un valor de ganancia diferente.

Las figuras 5.16, 5.18, 5.20, 5.21, 5.23, 5.25 y 5.27 muestran las respuestas temporales de la aceleración vertical de la caja, la aceleración de cabeceo, la aceleración de balanceo y la aceleración en los puntos que representan los asientos de los pasajeros en la parte delantera del vehículo a la derecha y a la izquierda y en la parte trasera a la derecha y a la izquierda respectivamente (color azul – vehículo ferroviario con suspensión pasiva; color verde – vehículo ferroviario con suspensión semiactiva).

Asimismo, las figuras 5.17, 5.19, 5.22, 5.24, 5.26 y 5.28 muestran las respuestas en frecuencia (valores PSD) de la aceleración vertical de la caja, la aceleración de cabeceo, la aceleración de balanceo y la aceleración en los puntos que representan los asientos de los pasajeros en la parte delantera del vehículo a la derecha y a la izquierda y en la parte trasera a la derecha y a la izquierda (figura superior— vehículo ferroviario con suspensión pasiva; figura inferior - vehículo ferroviario con suspensión semiactiva).

Finalmente las figuras 5.29, 5.30, 5.31 y 5.32 muestran el desplazamiento en los puntos que representan los asientos de los pasajeros en la parte delantera del vehículo a la derecha y a la izquierda y en la parte trasera a la derecha y a la izquierda (color azul – vehículo ferroviario con suspensión pasiva; color verde – vehículo ferroviario con suspensión semiactiva).

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

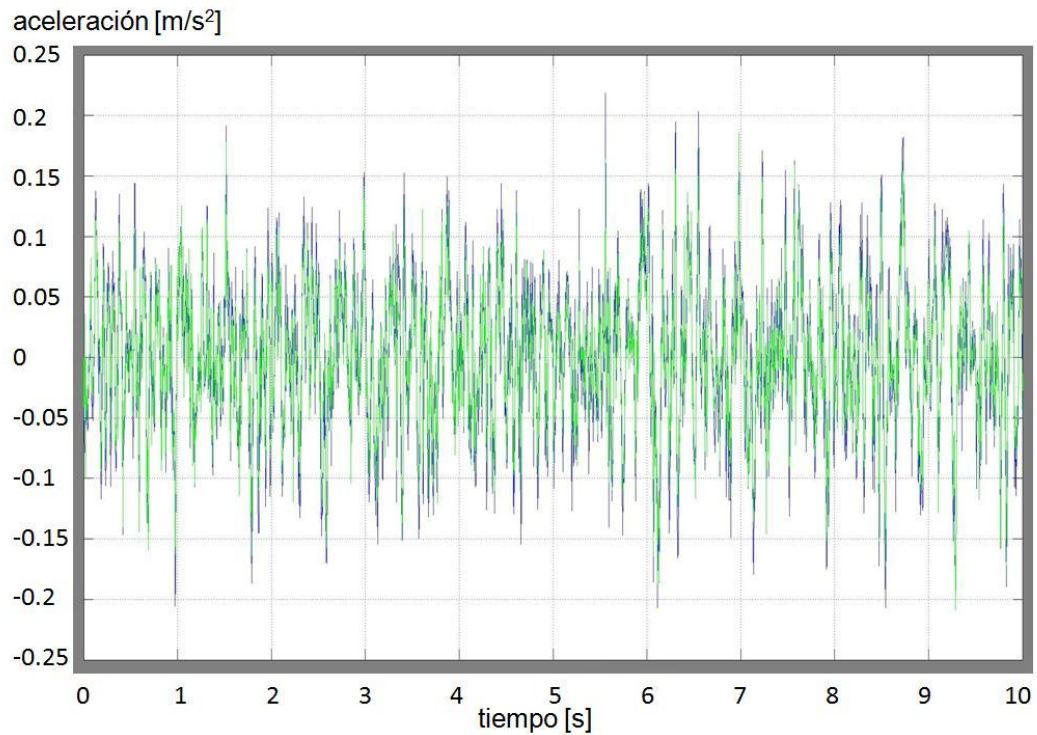


Figura 5.16 – Aceleración \ddot{z}_c para perfil de la vía con irregularidades periódicas

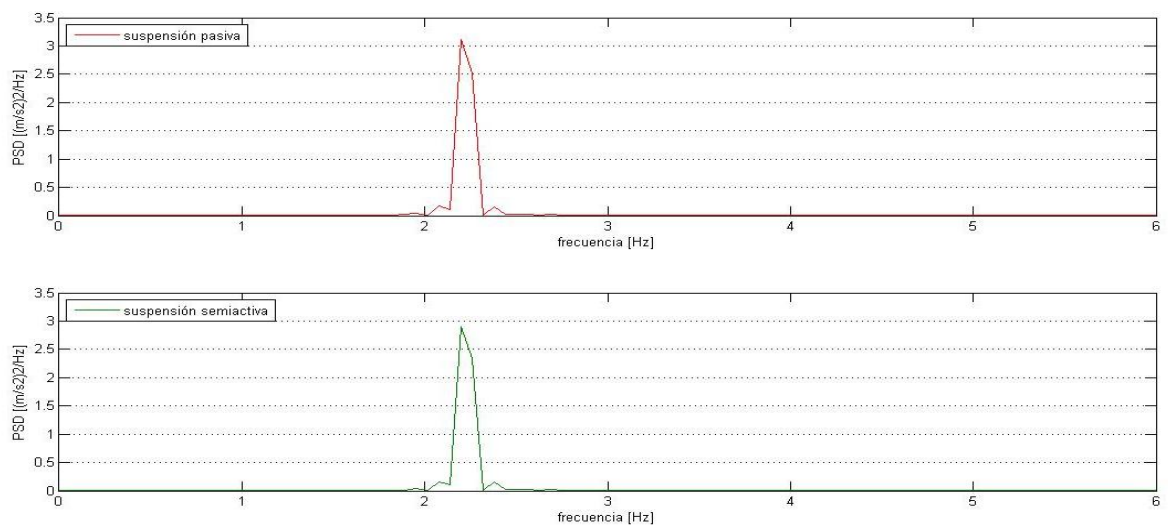


Figura 5.17 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_c para perfil de la vía con irregularidades periódicas

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

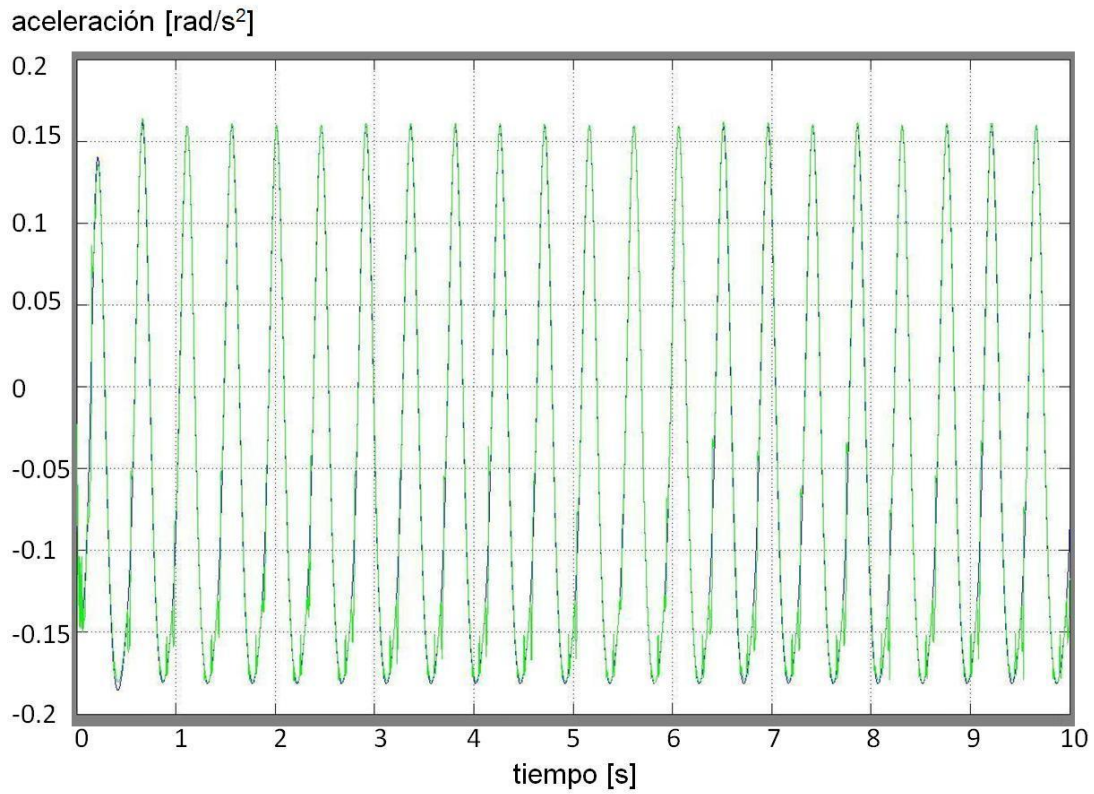


Figura 5.18 – Aceleración $\ddot{\phi}_c$ para perfil de la vía con irregularidades

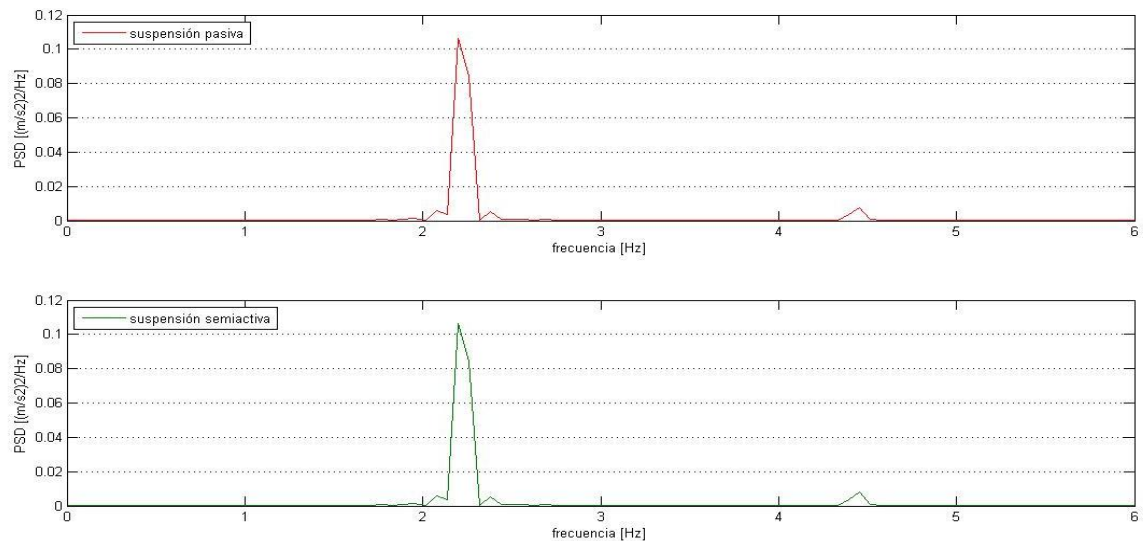


Figura 5.19 – Respuesta en frecuencia de la aceleración $\ddot{\phi}_c$ para perfil de la vía con irregularidades periódicas

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

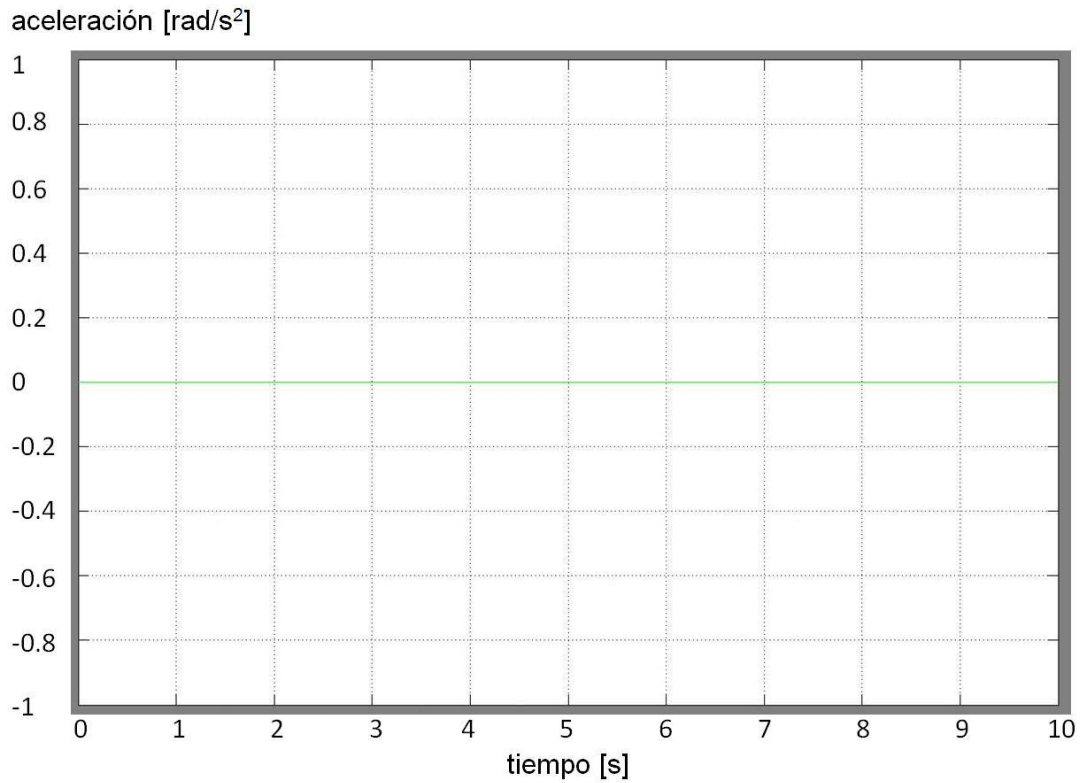


Figura 5.20 – Aceleración $\ddot{\theta}_c$ para perfil de la vía con irregularidades periódicas

Se observa en la figura 5.20, que al ser el perfil de los dos raíles de la vía exactamente iguales, no existe balanceo en ningún momento de la simulación.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

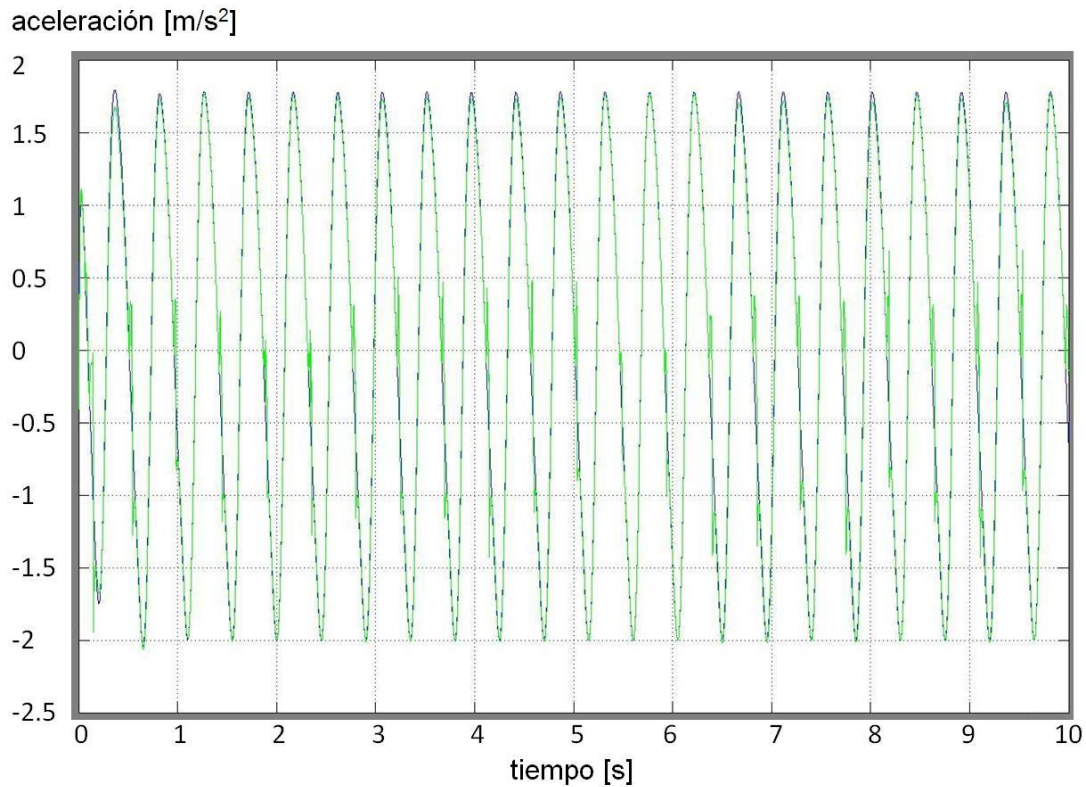


Figura 5.21 – Aceleración \ddot{z}_{fr} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

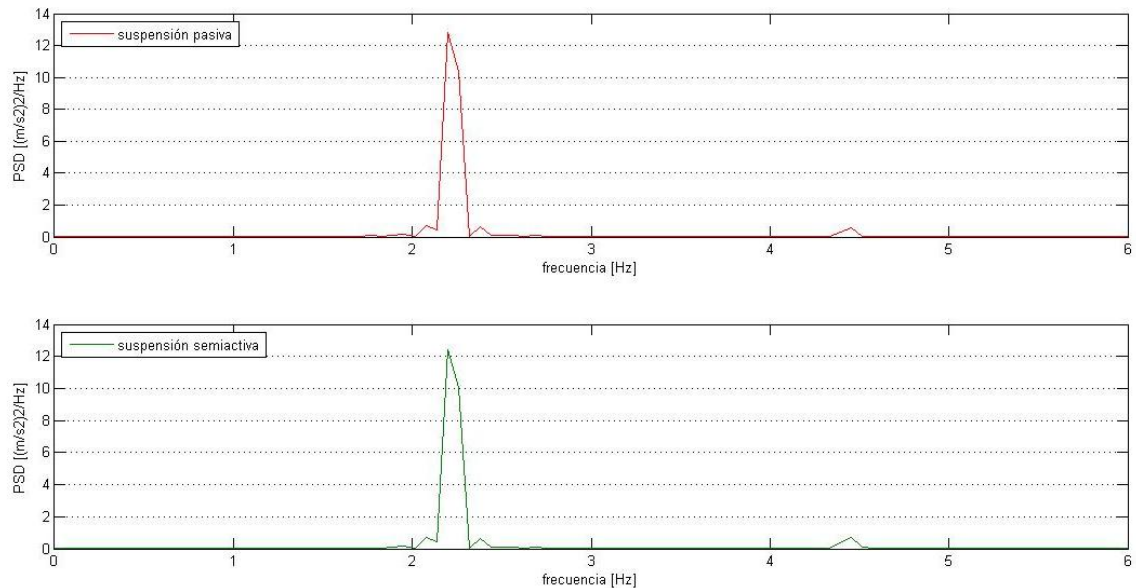


Figura 5.22 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{fr} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

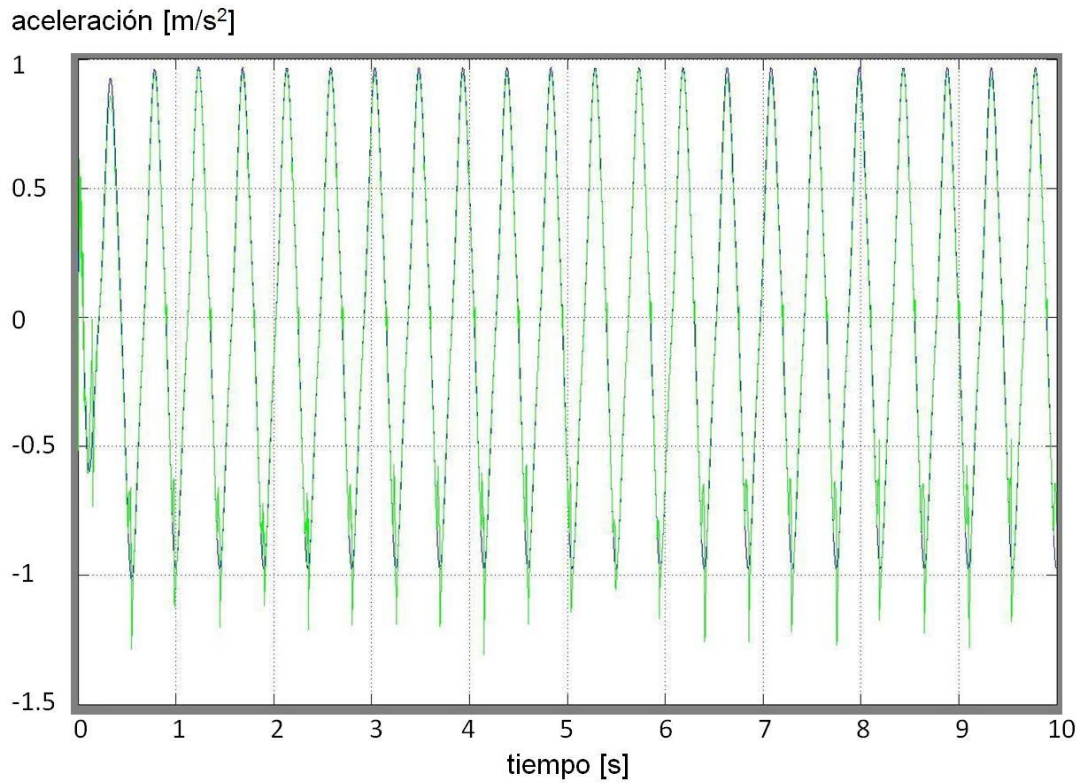


Figura 5.23 – Aceleración \ddot{z}_{f1} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

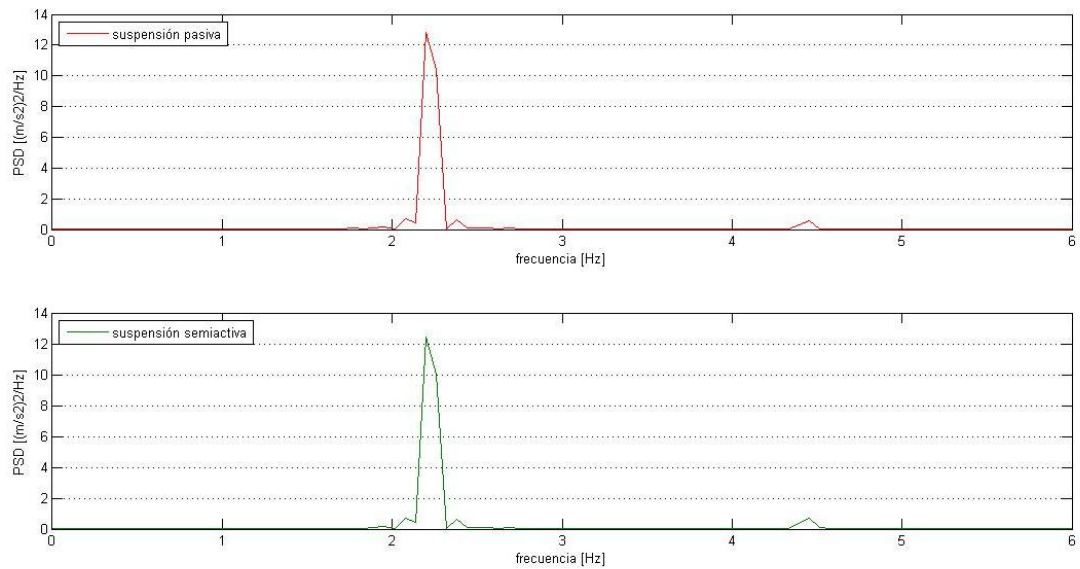


Figura 5.24 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{f1} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

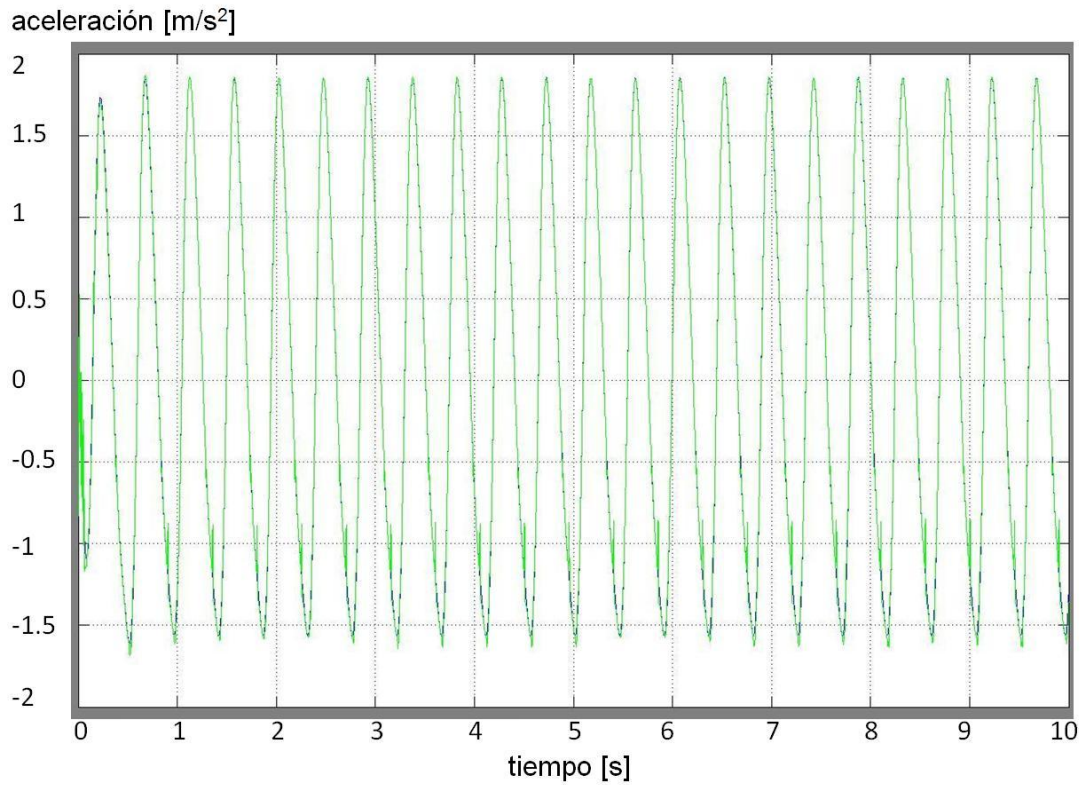


Figura 5.25 – Aceleración \ddot{z}_{rr} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

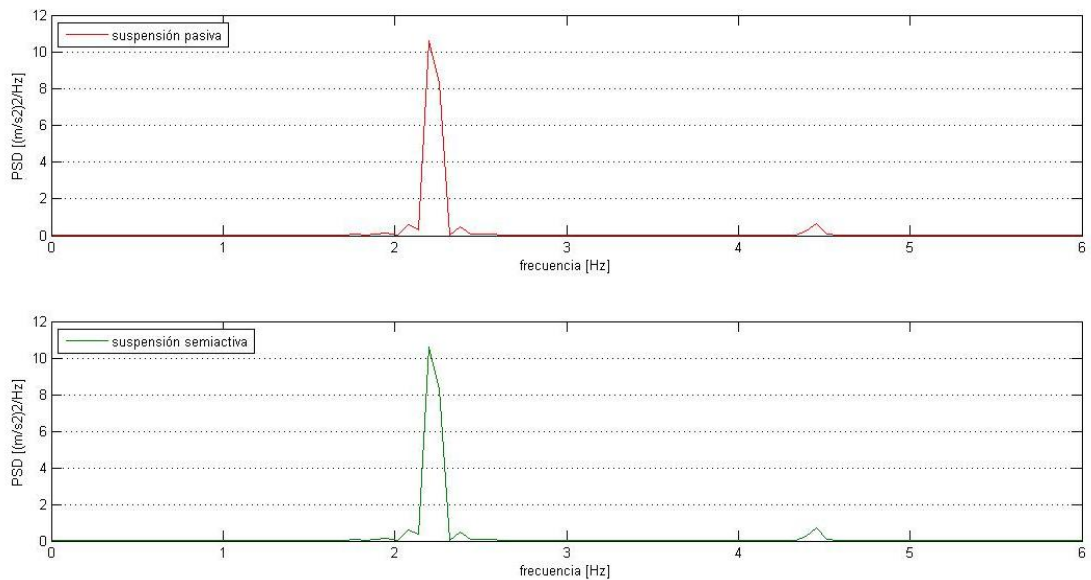


Figura 5.26 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{rr} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

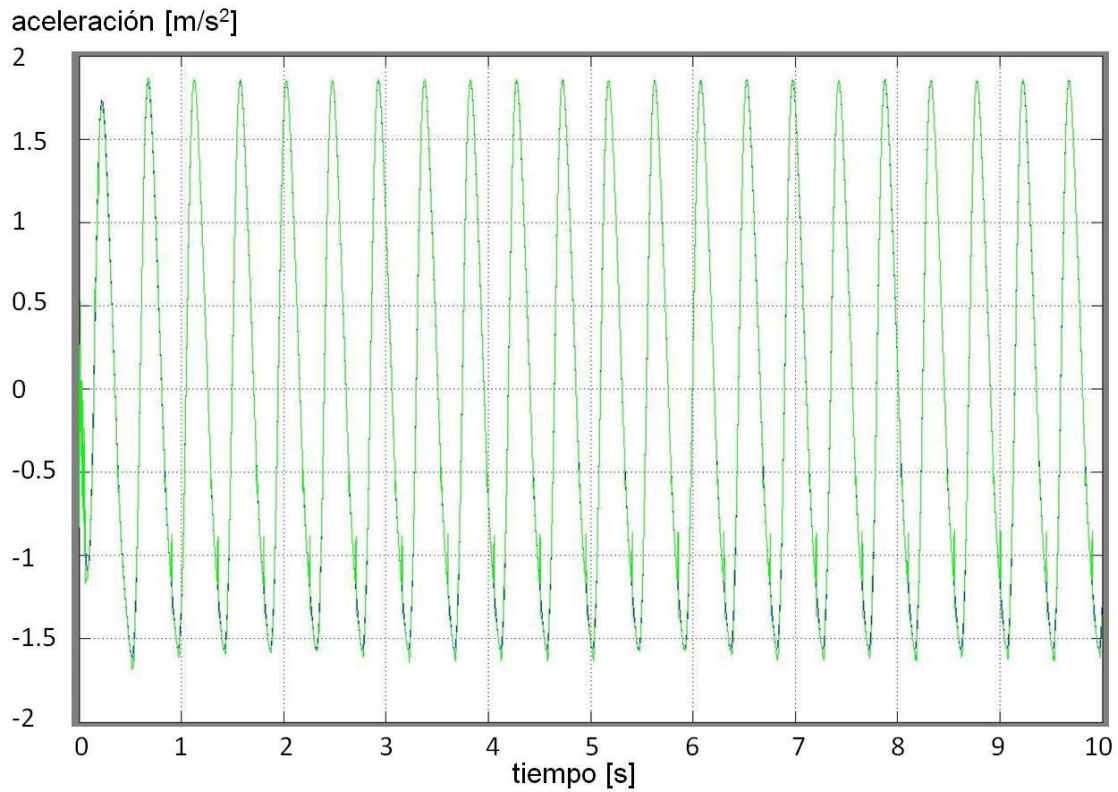


Figura 5.27 – Aceleración \ddot{z}_{r1} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

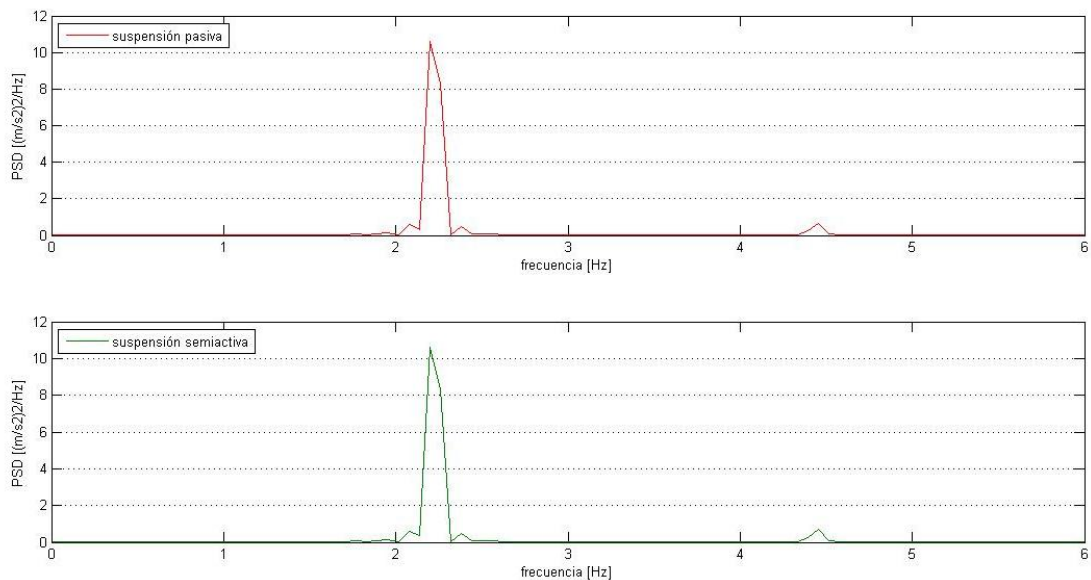


Figura 5.28 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{r1} para perfil de la vía con irregularidades periódicas

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

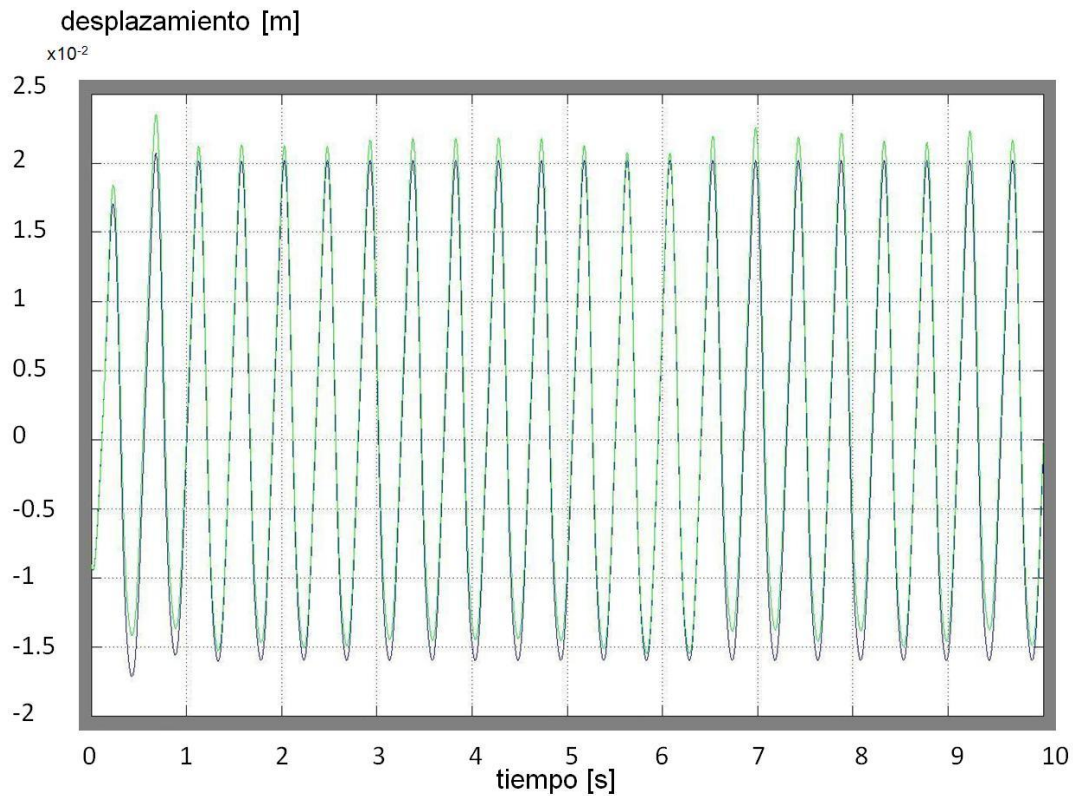


Figura 5.29 – Desplazamiento del asiento delantero derecho para perfil de la vía con irregularidades periódicas

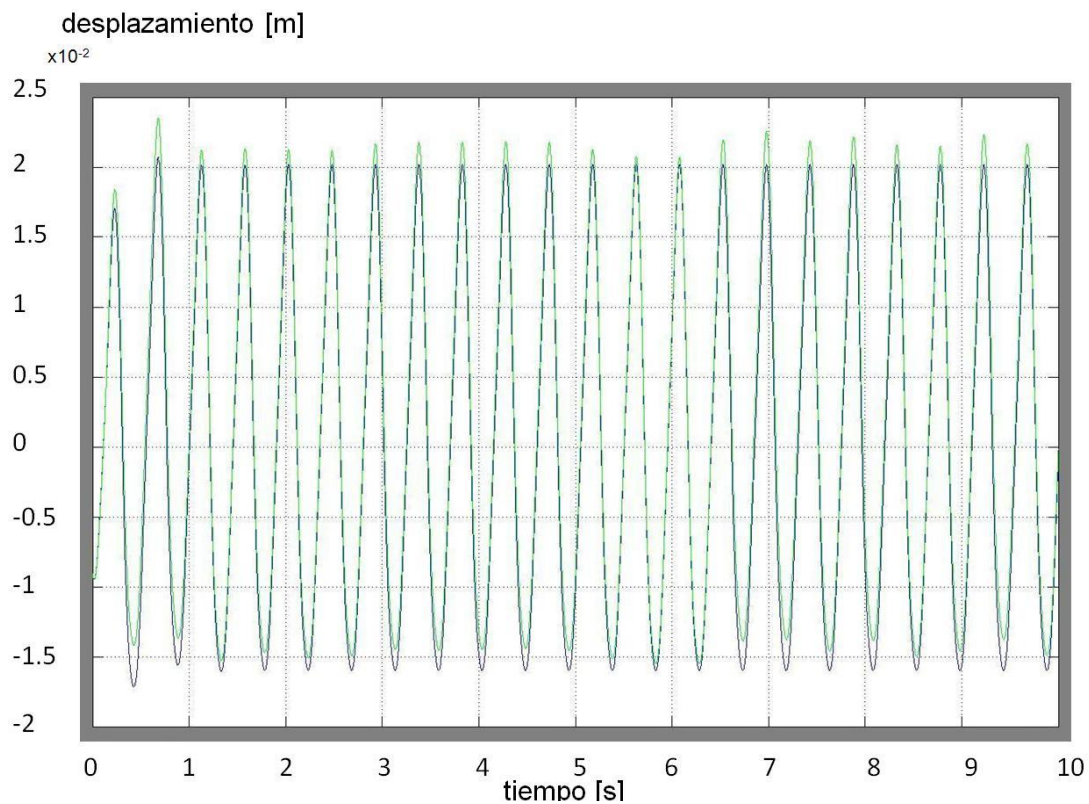


Figura 5.30 – Desplazamiento del asiento delantero izquierdo para perfil de la vía con irregularidades periódicas

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

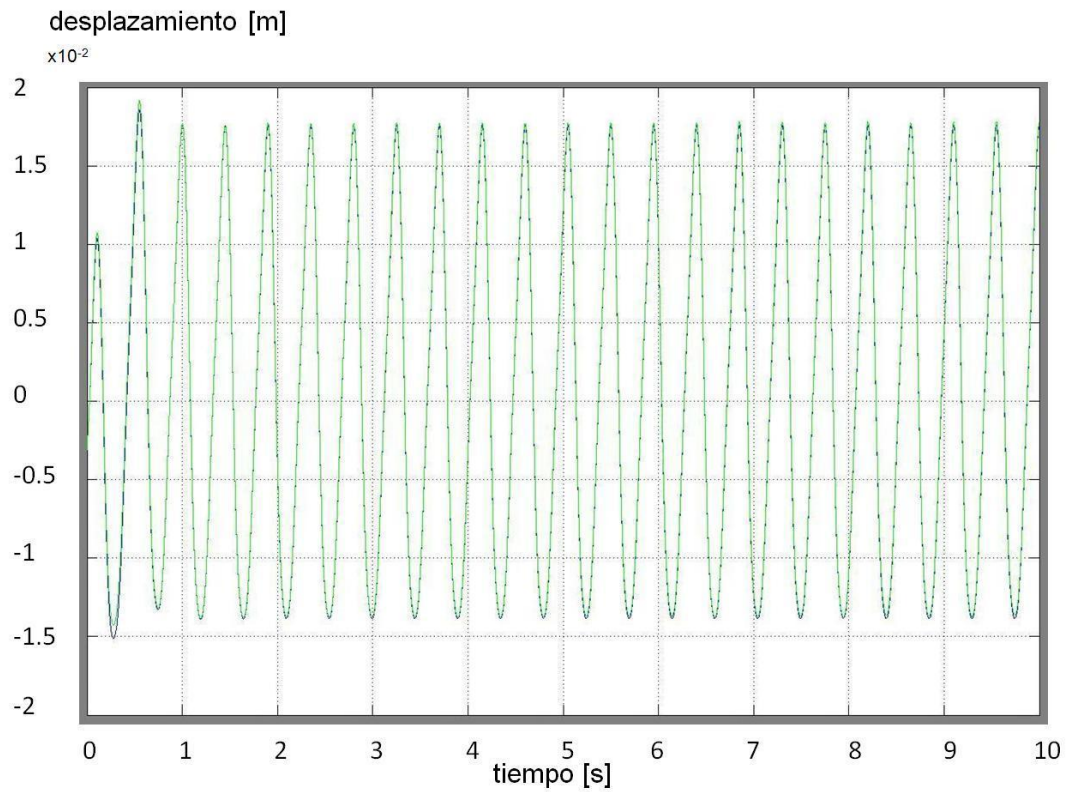


Figura 5.31 – Desplazamiento del asiento trasero derecho para perfil de la vía con irregularidades periódicas

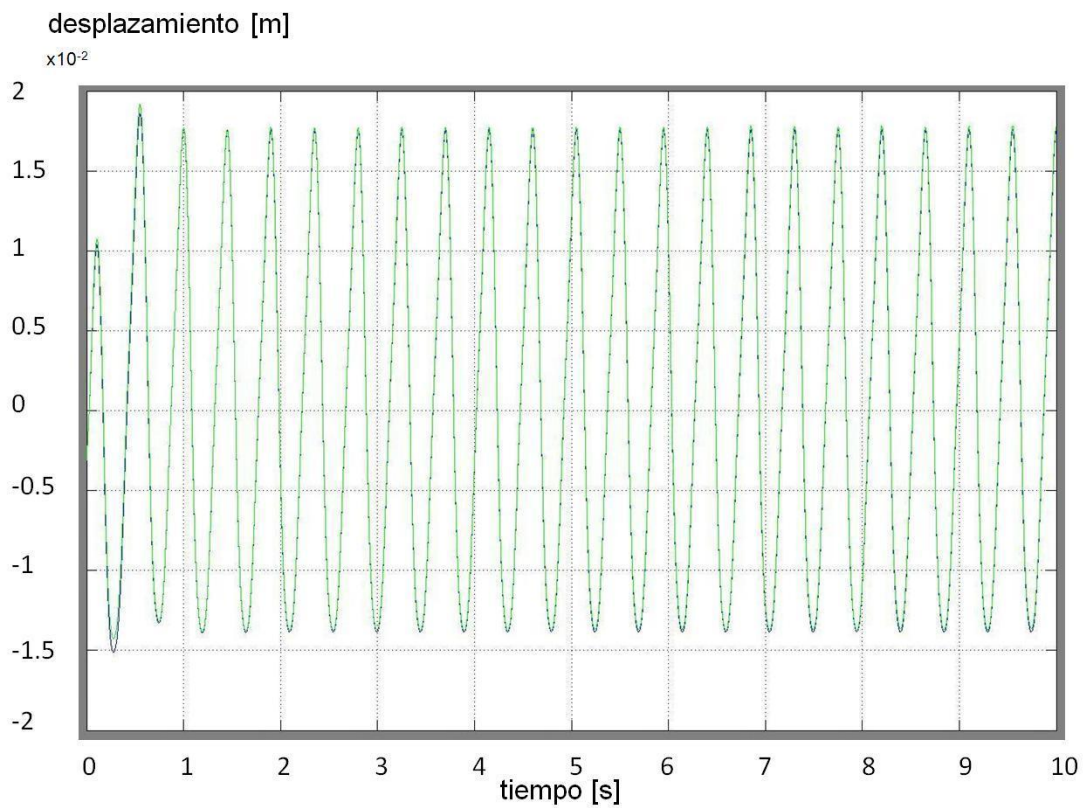


Figura 5.32 – Desplazamiento del asiento trasero izquierdo para perfil de la vía con irregularidades periódicas

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación se muestra la tabla 5.3, que representa los valores de la aceleración RMS para el movimiento en dirección vertical de la caja, cabeceo, balanceo y la aceleración RMS en los puntos que representan los asientos de los pasajeros en la parte delantera del vehículo a la derecha y a la izquierda y en la parte trasera a la derecha y a la izquierda respectivamente.

Tabla 5.3- Valores de la aceleración RMS para perfil de vía periódico

	SUSPENSIÓN PASIVA	SUSPENSIÓN SEMIACTIVA	REDUCCIÓN [%]
z_c'' [m/s ²]	2.0880	2.0854	0.12
ϕ_c'' [rad/s ²]	2.0431	2.0431	0
θ_c'' [rad/s ²]	2.0414	2.0414	0
z_{fr}'' [m/s ²]	2.2366	2.2329	0.17
z_{fl}'' [m/s ²]	2.2366	2.2329	0.17
z_{rr}'' [m/s ²]	2.2010	2.2017	-0.03
z_{rl}'' [m/s ²]	2.2010	2.2017	-0.03

De las figuras anteriores se puede indicar que los valores de las aceleraciones del modelo con suspensión semiactiva son similares a los valores de la suspensión pasiva. Además, se aprecia una mejora de la respuesta en frecuencia en el modelo con suspensión semiactiva, pero esta mejora es muy leve.

También como se aprecia en las figuras 5.29, 5.30, 5.31 y 5.32, que muestran la evolución de los desplazamientos en los puntos de los pasajeros, la trayectoria tanto en el modelo de suspensión pasiva como en el de suspensión semiactiva es parecida y no existe ninguna anomalía apreciable. Este es un resultado coherente que indica que el desarrollo de la simulación es correcto.

Por otro lado, el estudio de la RMS (tabla 5.5) para los valores de las aceleraciones indica que la mejora del sistema de suspensión es muy pequeña y se puede considerar despreciable.

En conclusión, con esta simulación no se ha logrado mejorar el sistema de suspensión de forma notable.

5.3.2- RESULTADOS PARA MODELO DE VEHÍCULO FERROVIARIO QUE CIRCULA POR UNA VÍA CON UN PERFIL DE IRREGULARIDADES ALEATORIAS.

A continuación, se muestran los resultados de simulación obtenidos para el segundo conjunto de reglas (tabla 8.2) y una ganancia de -2 para todos los asientos debido a que ha mostrado obtener mejores resultados que con el primer conjunto de reglas propuesto (tabla 8.1) o utilizando un valor de ganancia diferente.

Las figuras 5.33, 5.35, 5.37, 5.39, 5.41, 5.43 y 5.45 muestran las respuestas temporales de la aceleración vertical de la caja, la aceleración de cabeceo, la aceleración de balanceo y la aceleración en los puntos que representan los asientos de los pasajeros en la parte delantera del vehículo a la derecha y a la izquierda y en la parte trasera a la derecha y a la izquierda respectivamente (color azul – vehículo ferroviario con suspensión pasiva; color verde – vehículo ferroviario con suspensión semiactiva).

Asimismo, las figuras 5.34, 5.36, 5.38, 5.40, 5.42, 5.44 y 5.46 muestran las respuestas en frecuencia (valores PSD) de la aceleración vertical de la caja, la aceleración de cabeceo, la aceleración de balanceo y la aceleración en los puntos que representan los asientos de los pasajeros en la parte delantera del vehículo a la derecha y a la izquierda y en la parte trasera a la derecha y a la izquierda (figura superior— vehículo ferroviario con suspensión pasiva; figura inferior - vehículo ferroviario con suspensión semiactiva).

Finalmente las figuras 5.47, 5.48, 5.49 y 5.50 muestran el desplazamiento en los puntos que representan los asientos de los pasajeros en la parte delantera del vehículo a la derecha y a la izquierda y en la parte trasera a la derecha y a la izquierda (color azul – vehículo ferroviario con suspensión pasiva; color verde – vehículo ferroviario con suspensión semiactiva).

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

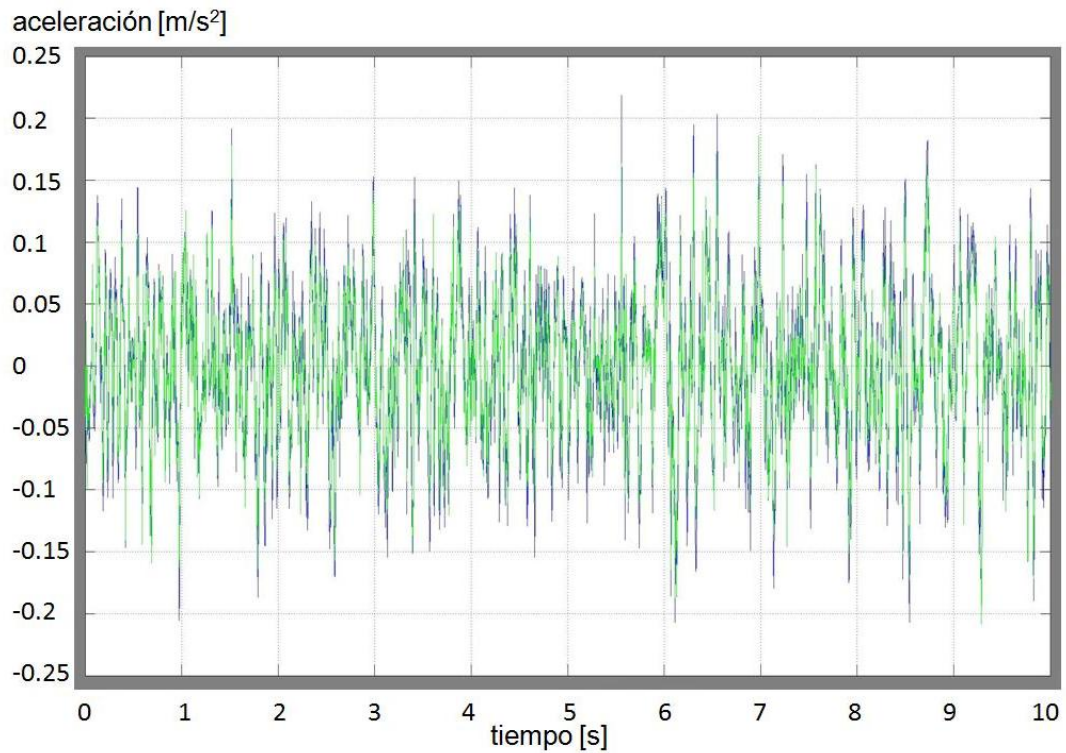


Figura 5.33 – Aceleración \ddot{z}_c para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

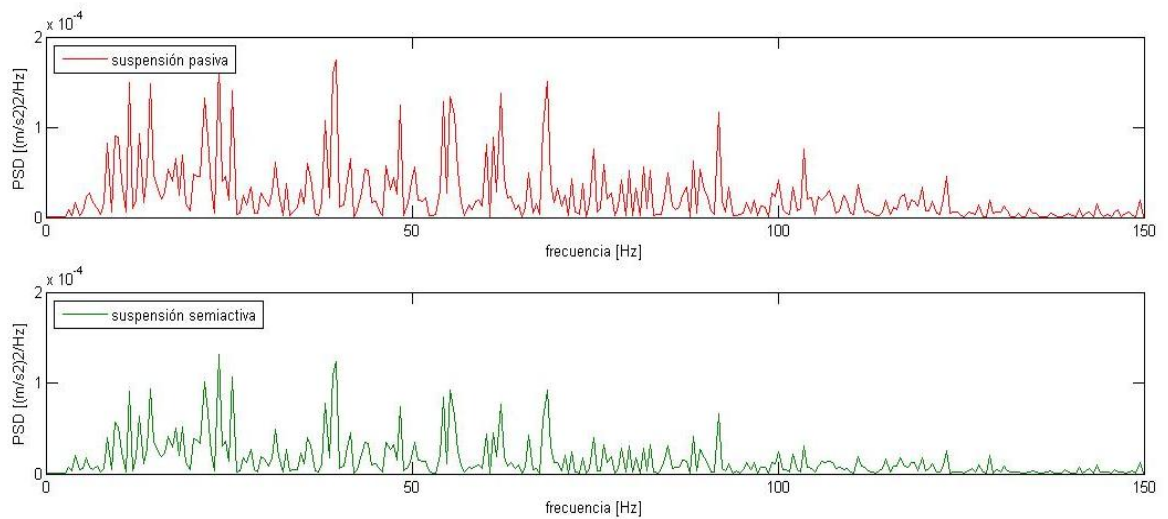


Figura 5.34 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_c para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

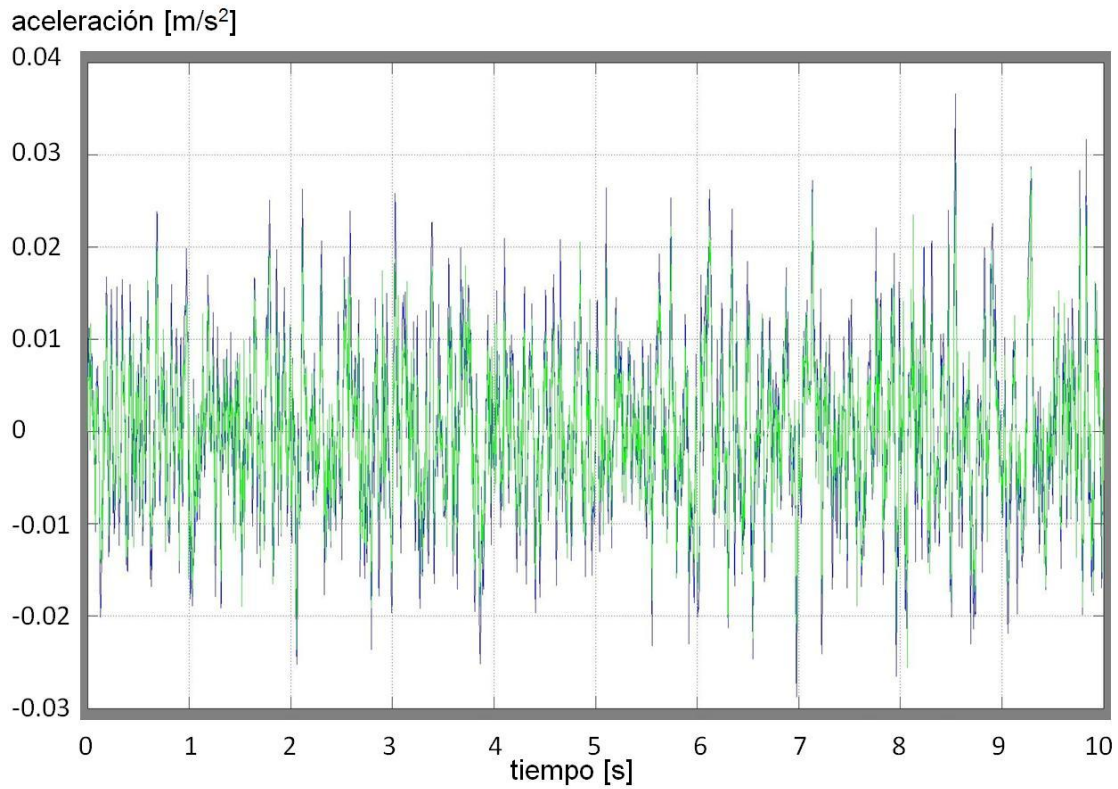


Figura 5.35 – Aceleración $\ddot{\phi}_c$ para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

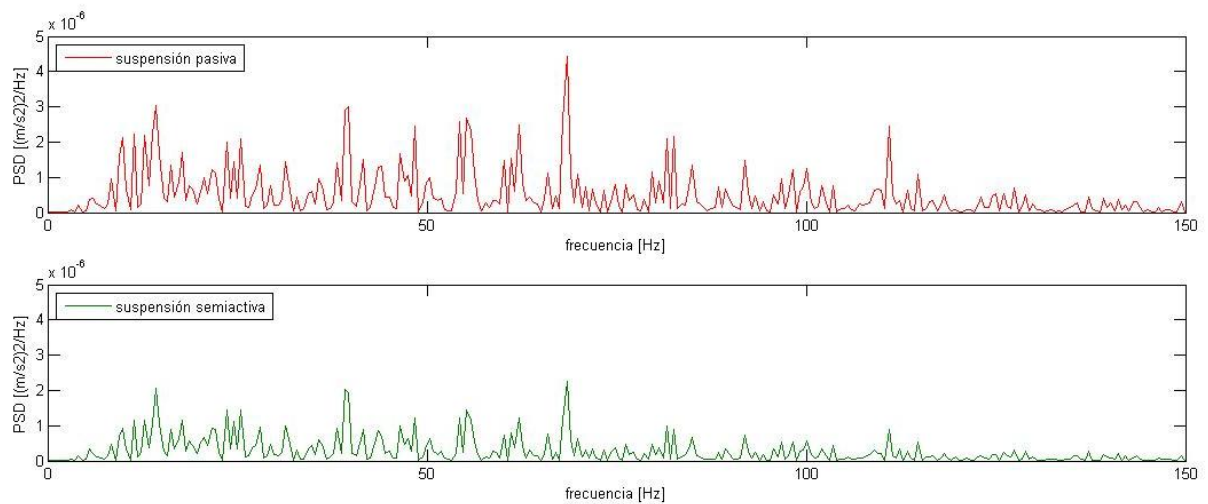


Figura 5.36 – Respuesta en frecuencia de la aceleración $\ddot{\phi}_c$ para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

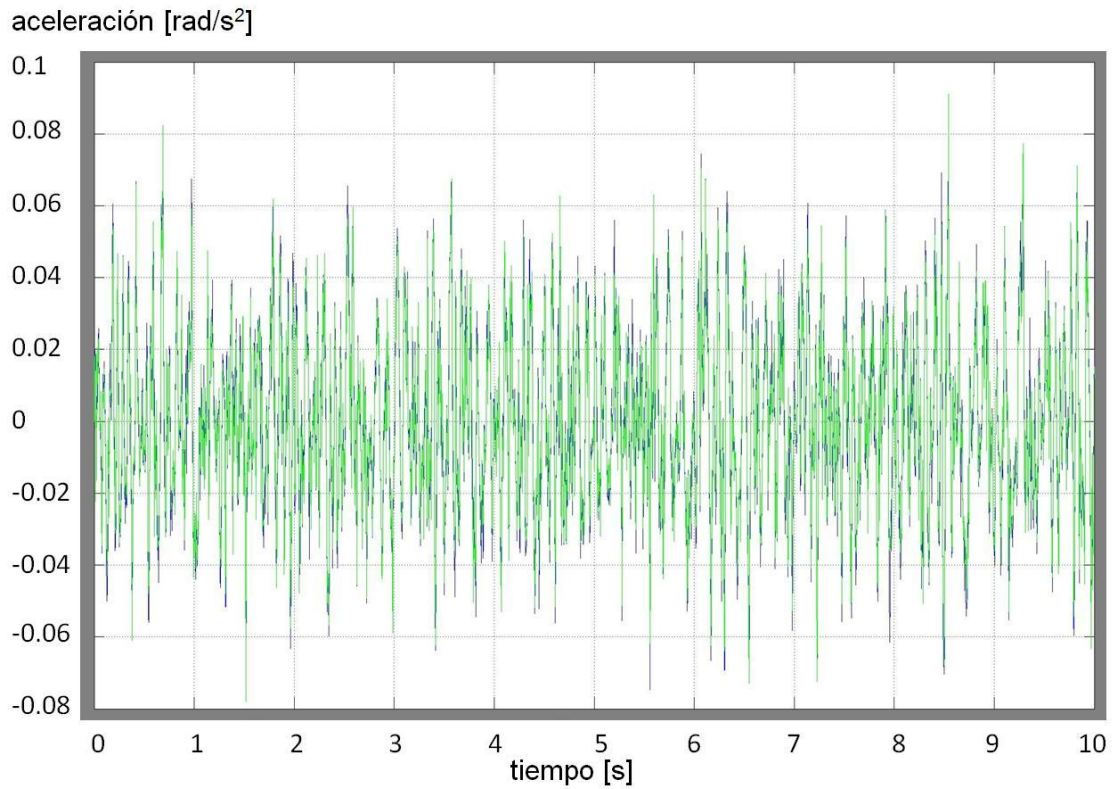


Figura 5.37 – Aceleración $\ddot{\theta}_c$ para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

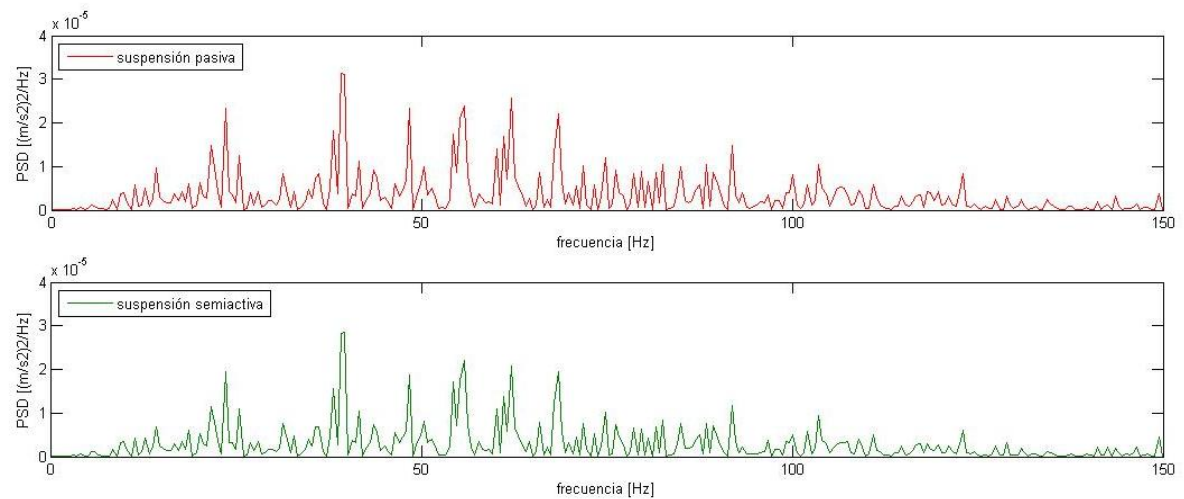


Figura 5.38 – Respuesta en frecuencia de la aceleración $\ddot{\theta}_c$ para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

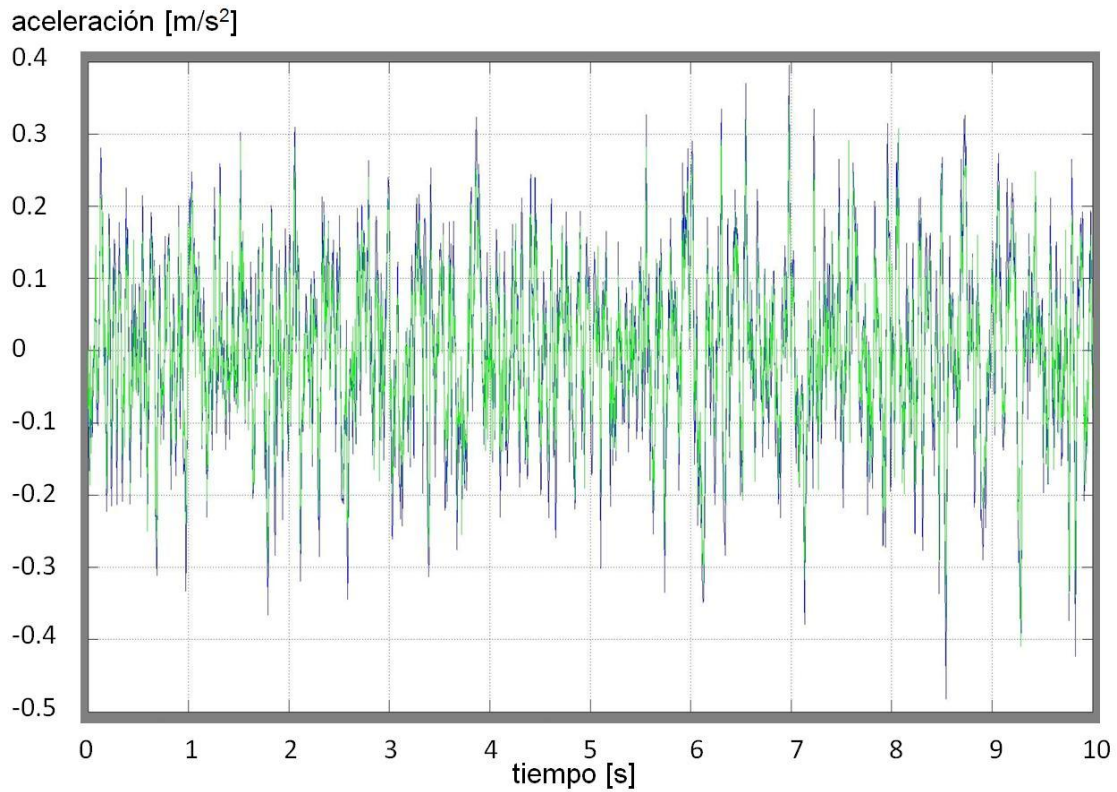


Figura 5.39 – Aceleración \ddot{z}_{fr} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

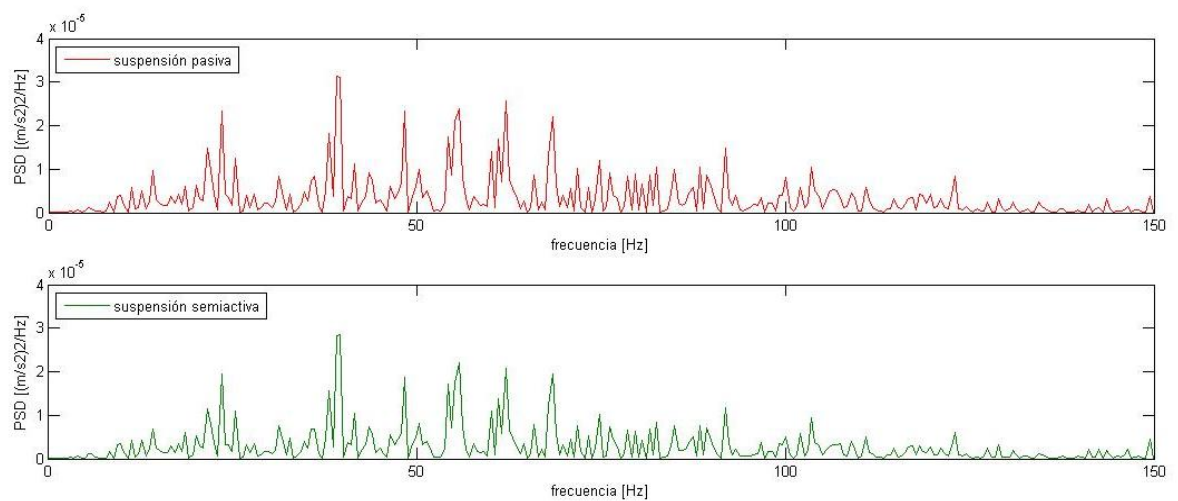


Figura 5.40 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{fr} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

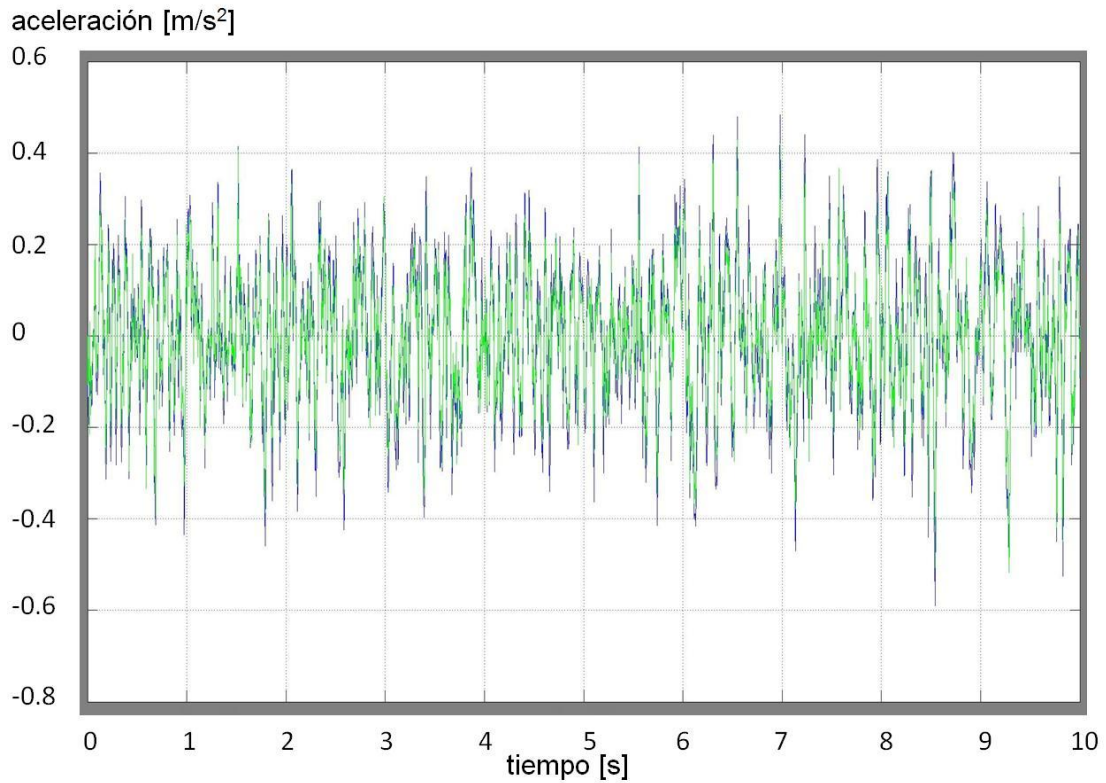


Figura 5.41 – Aceleración \ddot{z}_{f1} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

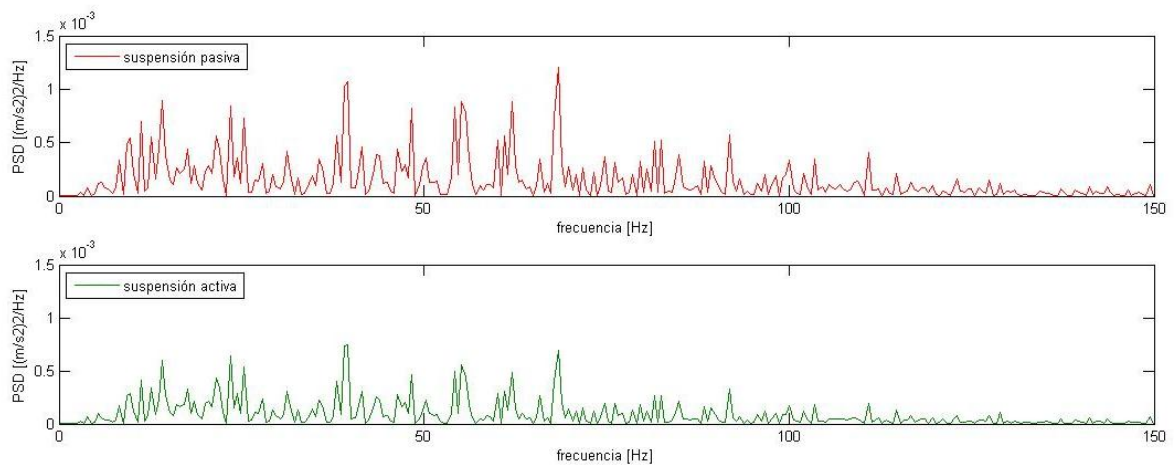


Figura 5.42 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{f1} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

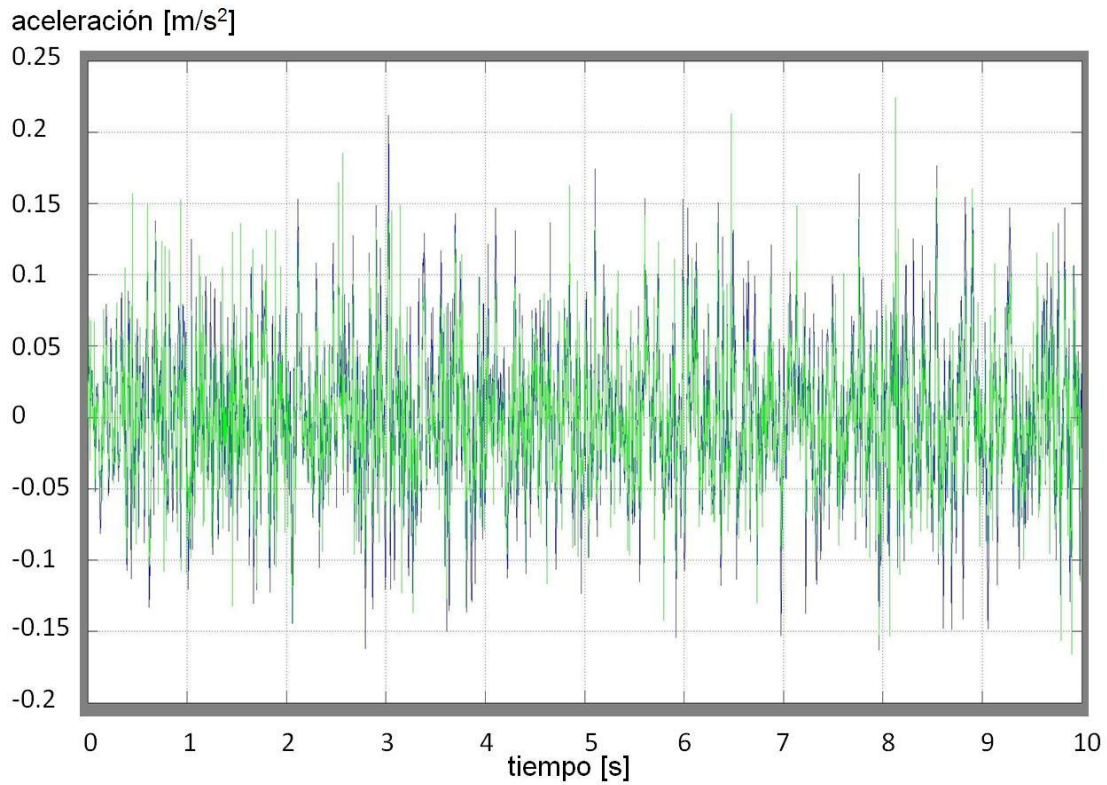


Figura 5.43 – Aceleración \ddot{z}_{rr} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

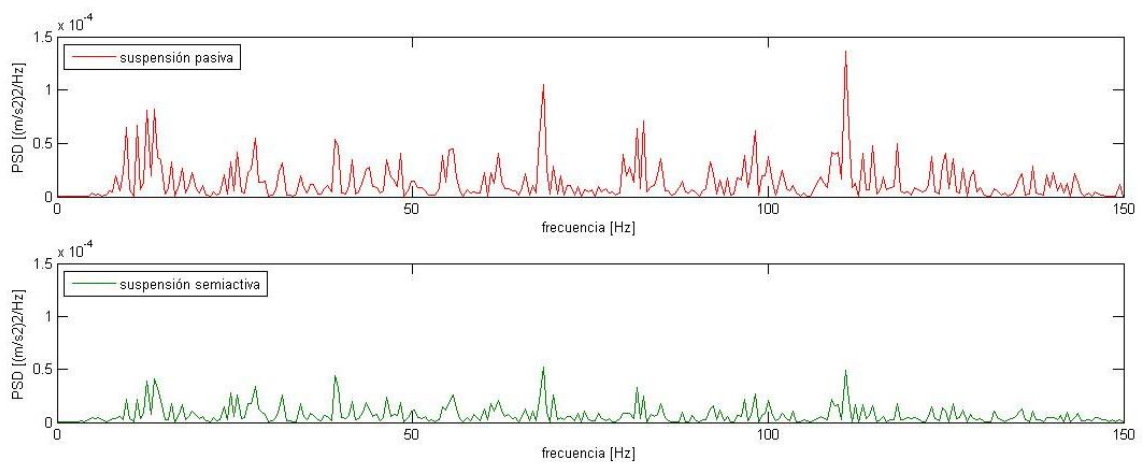


Figura 5.44 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{rr} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

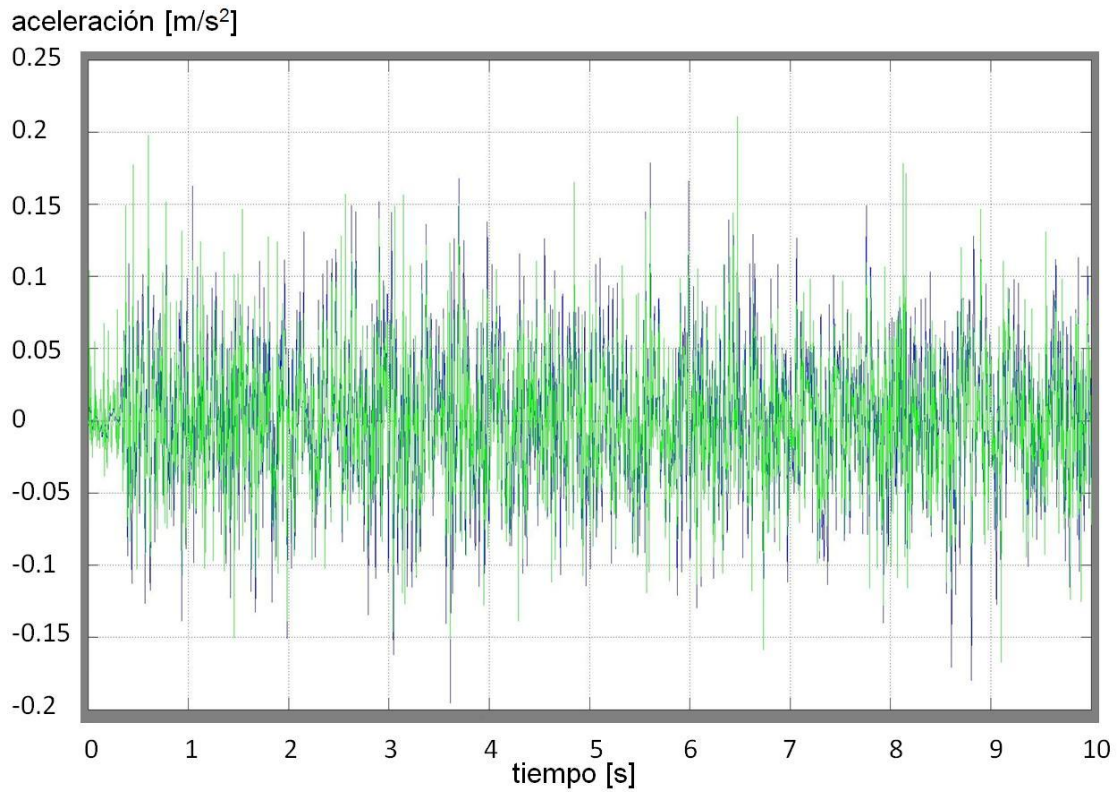


Figura 5.45 – Aceleración \ddot{z}_{r1} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

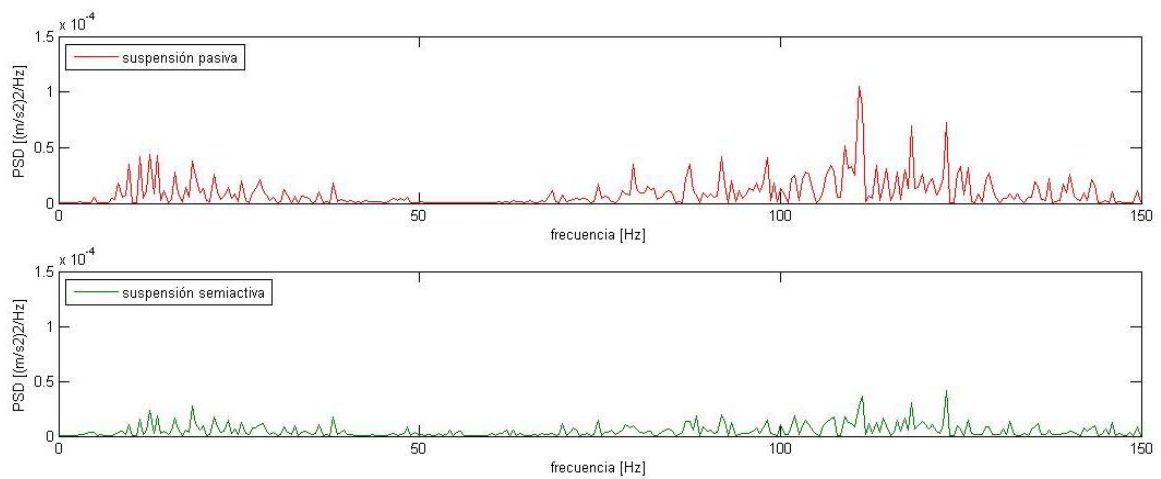


Figura 5.46 – Respuesta en frecuencia de la aceleración \ddot{z}_{r1} para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

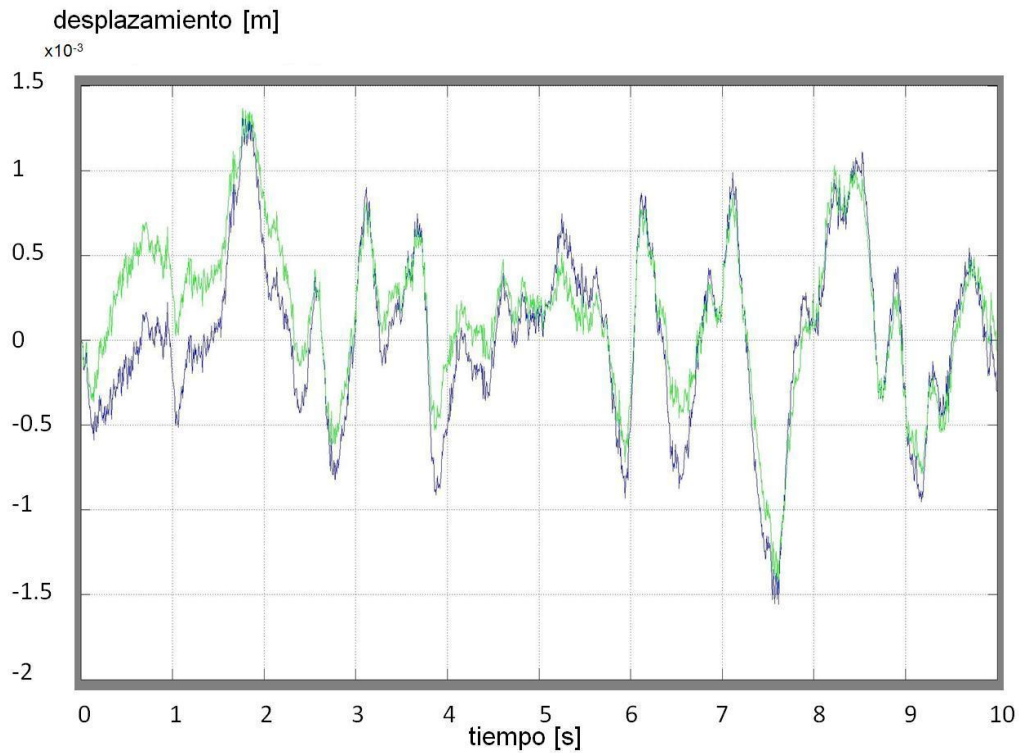


Figura 5.47 – Desplazamiento del asiento delantero derecho para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

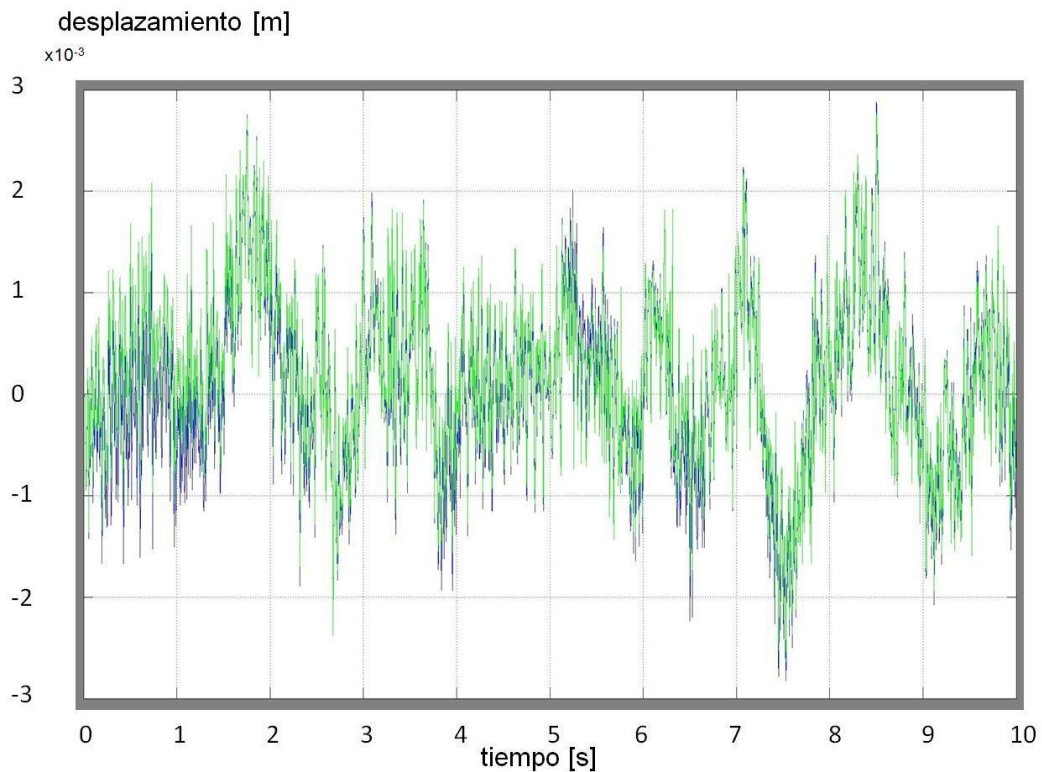


Figura 5.48 – Desplazamiento del asiento delantero izquierdo para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

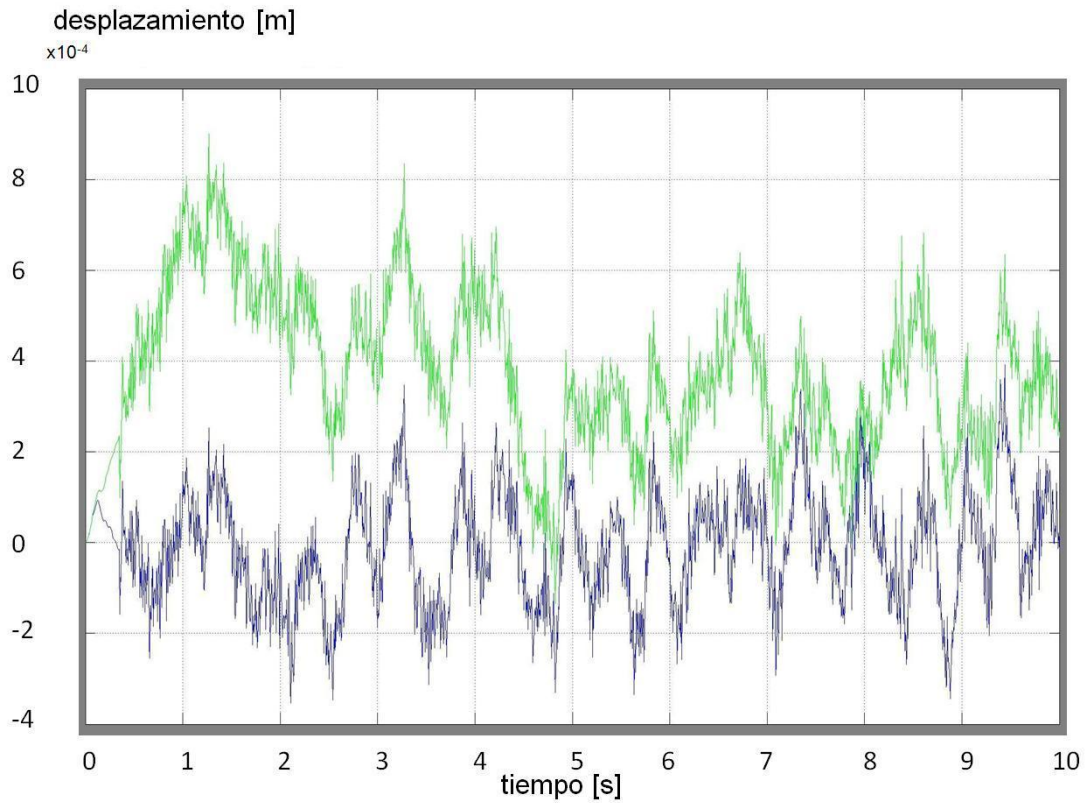


Figura 5.49 – Desplazamiento del asiento trasero derecho para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

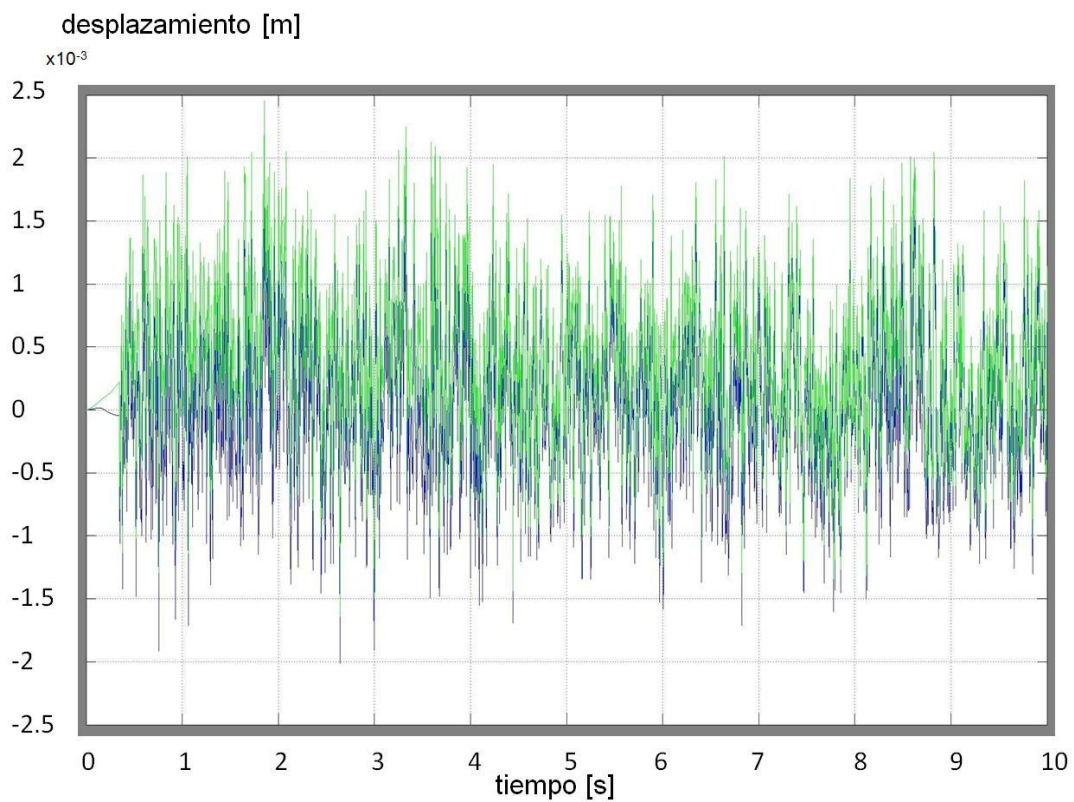


Figura 5.50 – Desplazamiento del asiento trasero izquierdo para perfil de la vía con irregularidades aleatorias

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación se muestra la tabla 5.4, que representa los valores de la aceleración RMS para el movimiento en dirección vertical de la caja, cabeceo, balanceo y la aceleración RMS en los puntos que representan los asientos de los pasajeros en la parte delantera del vehículo a la derecha y a la izquierda y en la parte trasera a la derecha y a la izquierda respectivamente.

Tabla 5.4- Valores de la aceleración RMS para perfil de vía aleatorio

	SUSPENSIÓN PASIVA	SUSPENSIÓN SEMIACTIVA	REDUCCIÓN [%]
z_c'' [m/s ²]	2.0428	2.0426	0.01
ϕ_c'' [rad/s ²]	2.0423	2.0423	0
θ_c'' [rad/s ²]	2.0423	2.0423	0
z_{fr}'' [m/s ²]	2.0442	2.0435	0.03
z_{fl}'' [m/s ²]	2.0453	2.0443	0.05
z_{rr}'' [m/s ²]	2.0426	2.0426	0
z_{rl}'' [m/s ²]	2.0426	2.0426	0

En este caso se observa en las figuras anteriores que los valores de las aceleraciones del modelo con suspensión semiactiva están por debajo del rango de actuación de los valores de la suspensión pasiva. Además se aprecia una mejora de la respuesta en frecuencia en el modelo con suspensión semiactiva.

Se observa también en las figuras 5.47, 5.48, 5.49 y 5.50, que muestran la evolución de los desplazamientos en los puntos de los pasajeros, que la trayectoria tanto en el modelo de suspensión pasiva como en el de suspensión semiactiva es parecida y no existe ninguna anomalía apreciable. Este es un resultado coherente que indica que el desarrollo de la simulación es correcto.

Por otro lado, el estudio de la RMS (tabla 5.6) para los valores de las aceleraciones indica que la mejora del sistema de suspensión es muy pequeña y se puede considerar despreciable.

En conclusión, con esta simulación no se ha logrado mejorar el sistema de suspensión de forma notable, pero se aprecia de forma más significativa una mejora en la respuesta en frecuencia del modelo.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1- CONCLUSIONES

En este proyecto se ha realizado el estudio del comportamiento de un vehículo ferroviario equipado con suspensión secundaria semiactiva. Para realizar este estudio se ha utilizado un modelo de vehículo ferroviario con nueve grados de libertad que tiene en cuenta la dinámica vertical, el balanceo y cabeceo.

De los resultados de simulación obtenidos se pueden extraer las conclusiones siguientes:

- Con las simulaciones realizadas no se ha conseguido una mejora significativa en el comportamiento de las suspensiones semiactivas frente a las pasivas. La mejora obtenida se observa al analizar la respuesta en frecuencia del sistema.
- El análisis de los resultados permite concretar que estos son correctos al no observarse ninguna anomalía en los mismos, como valores que se salgan de lo normal o que no sean coherentes.
- La lógica difusa es de gran utilidad a la hora de desarrollar el sistema de control ya que ofrece unos resultados muy satisfactorios. Además, *Matlab* tiene una herramienta con un entorno muy amigable para diseñar controladores de lógica difusa de forma sencilla e intuitiva.
- Tanto el modelo como el sistema de control son muy complejos, lo que hace que sea necesario realizar numerosas simulaciones mediante prueba y error cambiando los parámetros que definen el sistema.
- Este proyecto servirá como base para trabajos futuros acerca del comportamiento de los vehículos ferroviarios y mejora de la calidad de marcha y confort de los mismos.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.2- TRABAJOS FUTUROS

A la vista de los resultados obtenidos con el presente proyecto fin de carrera, se proponen los trabajos futuros siguientes:

- Mejorar el modelo para que se ajuste lo más posible a la realidad. Para ello se puede implementar un modelo de vehículo ferroviario con más grados de libertad, cambiar los parámetros del vehículo y mejorar el diseño de los perfiles de la vía. Además, se puede mejorar la implementación de los amortiguadores en el modelo de vehículo ferroviario, ya que en el presente proyecto se considera que no hay proceso de histéresis, no existe influencia de los topes y los amortiguadores se comportan de forma lineal.
- Realizar más simulaciones variando los parámetros que definen el sistema de control cambiando las reglas que lo gobiernan, el valor de la ganancia a la salida del controlador así como las entradas al controlador.
- Analizar los esfuerzos que actúan sobre los elementos del sistema de suspensión así como diseñar cómo sería el montaje más apropiado del sistema de suspensión en el vehículo.
- Por último, una vez desarrollado un sistema de suspensión semiactiva que mejore el comportamiento del vehículo ferroviario, hacer estudio económico y analizar la viabilidad del proyecto.

7. ANEXO

7. ANEXO

Tabla 8.1- Primer conjunto de reglas para el controlador

	DESPLAZAMIENTO	VELOCIDAD	ACELERACIÓN	FUERZA
1	NG	NG	NG	NG
2	NG	NG	NM	NG
3	NG	NG	NP	NG
4	NG	NG	ZE	NG
5	NG	NG	PP	NG
6	NG	NG	PM	NM
7	NG	NG	PG	NM
8	NG	NM	NG	NG
9	NG	NM	NM	NG
10	NG	NM	NP	NG
11	NG	NM	ZE	NM
12	NG	NM	PP	NM
13	NG	NM	PM	NM
14	NG	NM	PG	NP
15	NG	NP	NG	NG
16	NG	NP	NM	NG
17	NG	NP	NP	NM
18	NG	NP	ZE	NM
19	NG	NP	PP	NM
20	NG	NP	PM	NP
21	NG	NP	PG	NP
22	NG	ZE	NG	NG
23	NG	ZE	NM	NM
24	NG	ZE	NP	NM
25	NG	ZE	ZE	NP
26	NG	ZE	PP	NP
27	NG	ZE	PM	NP
28	NG	ZE	PG	NM
29	NG	PP	NG	NM
30	NG	PP	NM	NM
31	NG	PP	NP	NM
32	NG	PP	ZE	NP
33	NG	PP	PP	NP
34	NG	PP	PM	NP
35	NG	PP	PG	PP
36	NG	PM	NG	NM
37	NG	PM	NM	NM
38	NG	PM	NP	NP
39	NG	PM	ZE	NP
40	NG	PM	PP	ZE
41	NG	PM	PM	ZE
42	NG	PM	PG	PP
43	NG	PG	NG	NG
44	NG	PG	NM	NM
45	NG	PG	NP	NM
46	NG	PG	ZE	NP
47	NG	PG	PP	PP
48	NG	PG	PM	PP

7. ANEXO

49	NG	PG	PG	PM
50	NM	NG	NG	NG
51	NM	NG	NM	NM
52	NM	NG	NP	NM
53	NM	NG	ZE	NM
54	NM	NG	PP	NP
55	NM	NG	PM	NP
56	NM	NG	PG	NP
57	NM	NM	NG	NG
58	NM	NM	NM	NM
59	NM	NM	NP	NM
60	NM	NM	ZE	NM
61	NM	NM	PP	NP
62	NM	NM	PM	ZE
63	NM	NM	PG	ZE
64	NM	NP	NG	NM
65	NM	NP	NM	NM
66	NM	NP	NP	NP
67	NM	NP	ZE	NP
68	NM	NP	PP	NP
69	NM	NP	PM	ZE
70	NM	NP	PG	ZE
71	NM	ZE	NG	NM
72	NM	ZE	NM	NM
73	NM	ZE	NP	NP
74	NM	ZE	ZE	NP
75	NM	ZE	PP	ZE
76	NM	ZE	PM	ZE
77	NM	ZE	PG	PP
78	NM	PP	NG	NM
79	NM	PP	NM	NM
80	NM	PP	NP	NP
81	NM	PP	ZE	ZE
82	NM	PP	PP	ZE
83	NM	PP	PM	ZE
84	NM	PP	PG	PP
85	NM	PM	NG	NM
86	NM	PM	NM	NM
87	NM	PM	NP	NP
88	NM	PM	ZE	ZE
89	NM	PM	PP	ZE
90	NM	PM	PM	ZE
91	NM	PM	PG	PP
92	NM	PG	NG	NM
93	NM	PG	NM	NM
94	NM	PG	NP	NP
95	NM	PG	ZE	NP
96	NM	PG	PP	ZE
97	NM	PG	PM	PP
98	NM	PG	PG	PP
99	NP	NG	NG	NM

7. ANEXO

100	NP	NG	NM	NM
101	NP	NG	NP	NM
102	NP	NG	ZE	NP
103	NP	NG	PP	NP
104	NP	NG	PM	ZE
105	NP	NG	PG	ZE
106	NP	NM	NG	NM
107	NP	NM	NM	NM
108	NP	NM	NP	NP
109	NP	NM	ZE	NP
110	NP	NM	PP	ZE
111	NP	NM	PM	ZE
112	NP	NM	PG	PP
113	NP	NP	NG	NM
114	NP	NP	NM	NP
115	NP	NP	NP	NP
116	NP	NP	ZE	NP
117	NP	NP	PP	ZE
118	NP	NP	PM	ZE
119	NP	NP	PG	PP
120	NP	ZE	NG	NP
121	NP	ZE	NM	NM
122	NP	ZE	NP	NP
123	NP	ZE	ZE	ZE
124	NP	ZE	PP	ZE
125	NP	ZE	PM	PP
126	NP	ZE	PG	PP
127	NP	PP	NG	NP
128	NP	PP	NM	NP
129	NP	PP	NP	ZE
130	NP	PP	ZE	ZE
131	NP	PP	PP	PP
132	NP	PP	PM	PP
133	NP	PP	PG	PP
134	NP	PM	NG	NP
135	NP	PM	NM	NP
136	NP	PM	NP	NP
137	NP	PM	ZE	ZE
138	NP	PM	PP	ZE
139	NP	PM	PM	PP
140	NP	PM	PG	PM
141	NP	PG	NG	NP
142	NP	PG	NM	NP
143	NP	PG	NP	NP
144	NP	PG	ZE	ZE
145	NP	PG	PP	PP
146	NP	PG	PM	PP
147	NP	PG	PG	PM
148	ZE	NG	NG	NG
149	ZE	NG	NM	NM
150	ZE	NG	NP	NM

7. ANEXO

151	ZE	NG	ZE	ZE
152	ZE	NG	PP	ZE
153	ZE	NG	PM	ZE
154	ZE	NG	PG	PP
155	ZE	NM	NG	NM
156	ZE	NM	NM	NM
157	ZE	NM	NP	NP
158	ZE	NM	ZE	ZE
159	ZE	NM	PP	ZE
160	ZE	NM	PM	ZE
161	ZE	NM	PG	PP
162	ZE	NP	NG	NM
163	ZE	NP	NM	NP
164	ZE	NP	NP	NP
165	ZE	NP	ZE	NP
166	ZE	NP	PP	ZE
167	ZE	NP	PM	PP
168	ZE	NP	PG	PP
169	ZE	ZE	NG	NM
170	ZE	ZE	NM	NP
171	ZE	ZE	NP	NP
172	ZE	ZE	ZE	ZE
173	ZE	ZE	PP	ZE
174	ZE	ZE	PM	PP
175	ZE	ZE	PG	PM
176	ZE	PP	NG	NP
177	ZE	PP	NM	NP
178	ZE	PP	NP	ZE
179	ZE	PP	ZE	ZE
180	ZE	PP	PP	PP
181	ZE	PP	PM	PP
182	ZE	PP	PG	PM
183	ZE	PM	NG	NP
184	ZE	PM	NM	ZE
185	ZE	PM	NP	ZE
186	ZE	PM	ZE	ZE
187	ZE	PM	PP	PP
188	ZE	PM	PM	PM
189	ZE	PM	PG	PM
190	ZE	PG	NG	NP
191	ZE	PG	NM	ZE
192	ZE	PG	NP	ZE
193	ZE	PG	ZE	PP
194	ZE	PG	PP	PP
195	ZE	PG	PM	PM
196	ZE	PG	PG	PG
197	PP	NG	NG	NM
198	PP	NG	NM	NM
199	PP	NG	NP	NP
200	PP	NG	ZE	ZE
201	PP	NG	PP	ZE

7. ANEXO

202	PP	NG	PM	PP
203	PP	NG	PG	PP
204	PP	NM	NG	NP
205	PP	NM	NM	NP
206	PP	NM	NP	NP
207	PP	NM	ZE	ZE
208	PP	NM	PP	ZE
209	PP	NM	PM	PP
210	PP	NM	PG	PP
211	PP	NP	NG	NM
212	PP	NP	NM	NP
213	PP	NP	NP	NP
214	PP	NP	ZE	ZE
215	PP	NP	PP	PP
216	PP	NP	PM	PP
217	PP	NP	PG	PM
218	PP	ZE	NG	NP
219	PP	ZE	NM	NP
220	PP	ZE	NP	ZE
221	PP	ZE	ZE	ZE
222	PP	ZE	PP	PP
223	PP	ZE	PM	PP
224	PP	ZE	PG	PM
225	PP	PP	NG	NP
226	PP	PP	NM	NP
227	PP	PP	NP	ZE
228	PP	PP	ZE	PP
229	PP	PP	PP	PP
230	PP	PP	PM	PP
231	PP	PP	PG	PP
232	PP	PM	NG	NP
233	PP	PM	NM	NP
234	PP	PM	NP	ZE
235	PP	PM	ZE	ZE
236	PP	PM	PP	PP
237	PP	PM	PM	PM
238	PP	PM	PG	PM
239	PP	PG	NG	ZE
240	PP	PG	NM	ZE
241	PP	PG	NP	PP
242	PP	PG	ZE	PP
243	PP	PG	PP	PP
244	PP	PG	PM	PM
245	PP	PG	PG	PG
246	PM	NG	NG	NM
247	PM	NG	NM	NM
248	PM	NG	NP	NP
249	PM	NG	ZE	NP
250	PM	NG	PP	ZE
251	PM	NG	PM	ZE
252	PM	NG	PG	PP

7. ANEXO

253	PM	NM	NG	NM
254	PM	NM	NM	NM
255	PM	NM	NP	NP
256	PM	NM	ZE	ZE
257	PM	NM	PP	PP
258	PM	NM	PM	PP
259	PM	NM	PG	PP
260	PM	NP	NG	NP
261	PM	NP	NM	NP
262	PM	NP	NP	NP
263	PM	NP	ZE	ZE
264	PM	NP	PP	PP
265	PM	NP	PM	PP
266	PM	NP	PG	PM
267	PM	ZE	NG	NP
268	PM	ZE	NM	ZE
269	PM	ZE	NP	ZE
270	PM	ZE	ZE	PP
271	PM	ZE	PP	PP
272	PM	ZE	PM	PM
273	PM	ZE	PG	PM
274	PM	PP	NG	ZE
275	PM	PP	NM	ZE
276	PM	PP	NP	ZE
277	PM	PP	ZE	PP
278	PM	PP	PP	PP
279	PM	PP	PM	PM
280	PM	PP	PG	PM
281	PM	PM	NG	ZE
282	PM	PM	NM	ZE
283	PM	PM	NP	PP
284	PM	PM	ZE	PM
285	PM	PM	PP	PM
286	PM	PM	PM	PM
287	PM	PM	PG	PM
288	PM	PG	NG	PP
289	PM	PG	NM	PP
290	PM	PG	NP	PP
291	PM	PG	ZE	PM
292	PM	PG	PP	PM
293	PM	PG	PM	PG
294	PM	PG	PG	PG
295	PG	NG	NG	NM
296	PG	NG	NM	NP
297	PG	NG	NP	NP
298	PG	NG	ZE	ZE
299	PG	NG	PP	PP
300	PG	NG	PM	PP
301	PG	NG	PG	PM
302	PG	NM	NG	NM
303	PG	NM	NM	NP

7. ANEXO

304	PG	NM	NP	NP
305	PG	NM	ZE	ZE
306	PG	NM	PP	PP
307	PG	NM	PM	PP
308	PG	NM	PG	PM
309	PG	NP	NG	NP
310	PG	NP	NM	NP
311	PG	NP	NP	NP
312	PG	NP	ZE	ZE
313	PG	NP	PP	PP
314	PG	NP	PM	PP
315	PG	NP	PG	PM
316	PG	ZE	NG	ZE
317	PG	ZE	NM	ZE
318	PG	ZE	NP	PP
319	PG	ZE	ZE	PP
320	PG	ZE	PP	PM
321	PG	ZE	PM	PM
322	PG	ZE	PG	PG
323	PG	PP	NG	ZE
324	PG	PP	NM	ZE
325	PG	PP	NP	PP
326	PG	PP	ZE	PP
327	PG	PP	PP	PP
328	PG	PP	PM	PM
329	PG	PP	PG	PG
330	PG	PM	NG	ZE
331	PG	PM	NM	PP
332	PG	PM	NP	PP
333	PG	PM	ZE	PP
334	PG	PM	PP	PM
335	PG	PM	PM	PM
336	PG	PM	PG	PG
337	PG	PG	NG	PP
338	PG	PG	NM	PP
339	PG	PG	NP	PM
340	PG	PG	ZE	PM
341	PG	PG	PP	PM
342	PG	PG	PM	PG
343	PG	PG	PG	PG

7. ANEXO

Tabla 8.2- Segundo conjunto de reglas para el controlador

	DESPLAZAMIENTO	VELOCIDAD	ACELERACIÓN	FUERZA
1	NG	NG	NG	NG
2	NG	NG	NM	NG
3	NG	NG	NP	NG
4	NG	NG	ZE	NG
5	NG	NG	PP	ZE
6	NG	NG	PM	ZE
7	NG	NG	PG	ZE
8	NG	NM	NG	NG
9	NG	NM	NM	NG
10	NG	NM	NP	NM
11	NG	NM	ZE	NM
12	NG	NM	PP	ZE
13	NG	NM	PM	ZE
14	NG	NM	PG	ZE
15	NG	NP	NG	NG
16	NG	NP	NM	NG
17	NG	NP	NP	NM
18	NG	NP	ZE	NP
19	NG	NP	PP	ZE
20	NG	NP	PM	ZE
21	NG	NP	PG	NG
22	NG	ZE	NG	NM
23	NG	ZE	NM	NM
24	NG	ZE	NP	NP
25	NG	ZE	ZE	ZE
26	NG	ZE	PP	ZE
27	NG	ZE	PM	ZE
28	NG	ZE	PG	NM
29	NG	PP	NG	NM
30	NG	PP	NM	NM
31	NG	PP	NP	ZE
32	NG	PP	ZE	ZE
33	NG	PP	PP	ZE
34	NG	PP	PM	ZE
35	NG	PP	PG	ZE
36	NG	PM	NG	ZE
37	NG	PM	NM	ZE
38	NG	PM	NP	ZE
39	NG	PM	ZE	ZE
40	NG	PM	PP	ZE
41	NG	PM	PM	ZE
42	NG	PM	PG	ZE
43	NG	PG	NG	ZE
44	NG	PG	NM	ZE
45	NG	PG	NP	ZE
46	NG	PG	ZE	ZE

7. ANEXO

47	NG	PG	PP	ZE
48	NG	PG	PM	ZE
49	NG	PG	PG	ZE
50	NM	NG	NG	NG
51	NM	NG	NM	NM
52	NM	NG	NP	NM
53	NM	NG	ZE	ZE
54	NM	NG	PP	ZE
55	NM	NG	PM	ZE
56	NM	NG	PG	NG
57	NM	NM	NG	NG
58	NM	NM	NM	NM
59	NM	NM	NP	NM
60	NM	NM	ZE	NP
61	NM	NM	PP	ZE
62	NM	NM	PM	ZE
63	NM	NM	PG	ZE
64	NM	NP	NG	NM
65	NM	NP	NM	NM
66	NM	NP	NP	NP
67	NM	NP	ZE	NP
68	NM	NP	PP	ZE
69	NM	NP	PM	ZE
70	NM	NP	PG	NM
71	NM	ZE	NG	NP
72	NM	ZE	NM	NP
73	NM	ZE	NP	NP
74	NM	ZE	ZE	NP
75	NM	ZE	PP	ZE
76	NM	ZE	PM	ZE
77	NM	ZE	PG	ZE
78	NM	PP	NG	ZE
79	NM	PP	NM	ZE
80	NM	PP	NP	ZE
81	NM	PP	ZE	ZE
82	NM	PP	PP	ZE
83	NM	PP	PM	ZE
84	NM	PP	PG	ZE
85	NM	PM	NG	ZE
86	NM	PM	NM	ZE
87	NM	PM	NP	ZE
88	NM	PM	ZE	ZE
89	NM	PM	PP	ZE
90	NM	PM	PM	ZE
91	NM	PM	PG	ZE
92	NM	PG	NG	ZE
93	NM	PG	NM	ZE
94	NM	PG	NP	ZE
95	NM	PG	ZE	ZE
96	NM	PG	PP	ZE
97	NM	PG	PM	ZE

7. ANEXO

98	NM	PG	PG	NM
99	NP	NG	NG	NM
100	NP	NG	NM	NM
101	NP	NG	NP	NP
102	NP	NG	ZE	ZE
103	NP	NG	PP	ZE
104	NP	NG	PM	ZE
105	NP	NG	PG	ZE
106	NP	NM	NG	NM
107	NP	NM	NM	NM
108	NP	NM	NP	NP
109	NP	NM	ZE	NP
110	NP	NM	PP	ZE
111	NP	NM	PM	ZE
112	NP	NM	PG	ZE
113	NP	NP	NG	NM
114	NP	NP	NM	NP
115	NP	NP	NP	NP
116	NP	NP	ZE	NP
117	NP	NP	PP	ZE
118	NP	NP	PM	ZE
119	NP	NP	PG	ZE
120	NP	ZE	NG	NP
121	NP	ZE	NM	NP
122	NP	ZE	NP	NP
123	NP	ZE	ZE	ZE
124	NP	ZE	PP	ZE
125	NP	ZE	PM	ZE
126	NP	ZE	PG	ZE
127	NP	PP	NG	ZE
128	NP	PP	NM	ZE
129	NP	PP	NP	ZE
130	NP	PP	ZE	ZE
131	NP	PP	PP	ZE
132	NP	PP	PM	ZE
133	NP	PP	PG	ZE
134	NP	PM	NG	ZE
135	NP	PM	NM	ZE
136	NP	PM	NP	ZE
137	NP	PM	ZE	ZE
138	NP	PM	PP	ZE
139	NP	PM	PM	ZE
140	NP	PM	PG	ZE
141	NP	PG	NG	ZE
142	NP	PG	NM	ZE
143	NP	PG	NP	ZE
144	NP	PG	ZE	ZE
145	NP	PG	PP	ZE
146	NP	PG	PM	ZE
147	NP	PG	PG	ZE
148	ZE	NG	NG	NG

7. ANEXO

149	ZE	NG	NM	NM
150	ZE	NG	NP	NM
151	ZE	NG	ZE	ZE
152	ZE	NG	PP	ZE
153	ZE	NG	PM	ZE
154	ZE	NG	PG	ZE
155	ZE	NM	NG	NM
156	ZE	NM	NM	NM
157	ZE	NM	NP	NP
158	ZE	NM	ZE	ZE
159	ZE	NM	PP	ZE
160	ZE	NM	PM	ZE
161	ZE	NM	PG	ZE
162	ZE	NP	NG	NM
163	ZE	NP	NM	NP
164	ZE	NP	NP	NP
165	ZE	NP	ZE	NP
166	ZE	NP	PP	ZE
167	ZE	NP	PM	ZE
168	ZE	NP	PG	ZE
169	ZE	ZE	NG	NM
170	ZE	ZE	NM	NP
171	ZE	ZE	NP	NP
172	ZE	ZE	ZE	ZE
173	ZE	ZE	PP	PP
174	ZE	ZE	PM	PP
175	ZE	ZE	PG	PM
176	ZE	PP	NG	ZE
177	ZE	PP	NM	ZE
178	ZE	PP	NP	ZE
179	ZE	PP	ZE	ZE
180	ZE	PP	PP	PP
181	ZE	PP	PM	PP
182	ZE	PP	PG	PM
183	ZE	PM	NG	ZE
184	ZE	PM	NM	ZE
185	ZE	PM	NP	ZE
186	ZE	PM	ZE	ZE
187	ZE	PM	PP	PP
188	ZE	PM	PM	PM
189	ZE	PM	PG	PM
190	ZE	PG	NG	ZE
191	ZE	PG	NM	ZE
192	ZE	PG	NP	ZE
193	ZE	PG	ZE	PP
194	ZE	PG	PP	PP
195	ZE	PG	PM	PM
196	ZE	PG	PG	PG
197	PP	NG	NG	ZE
198	PP	NG	NM	ZE
199	PP	NG	NP	ZE

7. ANEXO

200	PP	NG	ZE	ZE
201	PP	NG	PP	ZE
202	PP	NG	PM	ZE
203	PP	NG	PG	ZE
204	PP	NM	NG	ZE
205	PP	NM	NM	ZE
206	PP	NM	NP	ZE
207	PP	NM	ZE	ZE
208	PP	NM	PP	ZE
209	PP	NM	PM	ZE
210	PP	NM	PG	ZE
211	PP	NP	NG	ZE
212	PP	NP	NM	ZE
213	PP	NP	NP	ZE
214	PP	NP	ZE	ZE
215	PP	NP	PP	ZE
216	PP	NP	PM	ZE
217	PP	NP	PG	ZE
218	PP	ZE	NG	ZE
219	PP	ZE	NM	ZE
220	PP	ZE	NP	ZE
221	PP	ZE	ZE	ZE
222	PP	ZE	PP	PP
223	PP	ZE	PM	PP
224	PP	ZE	PG	PM
225	PP	PP	NG	ZE
226	PP	PP	NM	ZE
227	PP	PP	NP	ZE
228	PP	PP	ZE	PP
229	PP	PP	PP	PP
230	PP	PP	PM	PP
231	PP	PP	PG	PM
232	PP	PM	NG	ZE
233	PP	PM	NM	ZE
234	PP	PM	NP	ZE
235	PP	PM	ZE	ZE
236	PP	PM	PP	PP
237	PP	PM	PM	PM
238	PP	PM	PG	PM
239	PP	PG	NG	ZE
240	PP	PG	NM	ZE
241	PP	PG	NP	ZE
242	PP	PG	ZE	PP
243	PP	PG	PP	PP
244	PP	PG	PM	PM
245	PP	PG	PG	PG
246	PM	NG	NG	ZE
247	PM	NG	NM	ZE
248	PM	NG	NP	ZE
249	PM	NG	ZE	ZE
250	PM	NG	PP	ZE

7. ANEXO

251	PM	NG	PM	ZE
252	PM	NG	PG	ZE
253	PM	NM	NG	ZE
254	PM	NM	NM	ZE
255	PM	NM	NP	ZE
256	PM	NM	ZE	ZE
257	PM	NM	PP	ZE
258	PM	NM	PM	ZE
259	PM	NM	PG	ZE
260	PM	NP	NG	ZE
261	PM	NP	NM	ZE
262	PM	NP	NP	ZE
263	PM	NP	ZE	ZE
264	PM	NP	PP	ZE
265	PM	NP	PM	ZE
266	PM	NP	PG	ZE
267	PM	ZE	NG	ZE
268	PM	ZE	NM	ZE
269	PM	ZE	NP	ZE
270	PM	ZE	ZE	PP
271	PM	ZE	PP	PP
272	PM	ZE	PM	PM
273	PM	ZE	PG	PM
274	PM	PP	NG	ZE
275	PM	PP	NM	ZE
276	PM	PP	NP	ZE
277	PM	PP	ZE	PP
278	PM	PP	PP	PP
279	PM	PP	PM	PM
280	PM	PP	PG	PM
281	PM	PM	NG	ZE
282	PM	PM	NM	ZE
283	PM	PM	NP	ZE
284	PM	PM	ZE	PM
285	PM	PM	PP	PM
286	PM	PM	PM	PM
287	PM	PM	PG	PM
288	PM	PG	NG	ZE
289	PM	PG	NM	ZE
290	PM	PG	NP	ZE
291	PM	PG	ZE	PM
292	PM	PG	PP	PM
293	PM	PG	PM	PG
294	PM	PG	PG	PG
295	PG	NG	NG	ZE
296	PG	NG	NM	ZE
297	PG	NG	NP	ZE
298	PG	NG	ZE	ZE
299	PG	NG	PP	ZE
300	PG	NG	PM	ZE
301	PG	NG	PG	ZE

7. ANEXO

302	PG	NM	NG	ZE
303	PG	NM	NM	ZE
304	PG	NM	NP	ZE
305	PG	NM	ZE	ZE
306	PG	NM	PP	ZE
307	PG	NM	PM	ZE
308	PG	NM	PG	ZE
309	PG	NP	NG	ZE
310	PG	NP	NM	ZE
311	PG	NP	NP	ZE
312	PG	NP	ZE	ZE
313	PG	NP	PP	ZE
314	PG	NP	PM	ZE
315	PG	NP	PG	ZE
316	PG	ZE	NG	ZE
317	PG	ZE	NM	ZE
318	PG	ZE	NP	ZE
319	PG	ZE	ZE	PP
320	PG	ZE	PP	PM
321	PG	ZE	PM	PM
322	PG	ZE	PG	PG
323	PG	PP	NG	ZE
324	PG	PP	NM	ZE
325	PG	PP	NP	ZE
326	PG	PP	ZE	PP
327	PG	PP	PP	PP
328	PG	PP	PM	PM
329	PG	PP	PG	PG
330	PG	PM	NG	ZE
331	PG	PM	NM	ZE
332	PG	PM	NP	ZE
333	PG	PM	ZE	PP
334	PG	PM	PP	PM
335	PG	PM	PM	PM
336	PG	PM	PG	PG
337	PG	PG	NG	ZE
338	PG	PG	NM	ZE
339	PG	PG	NP	ZE
340	PG	PG	ZE	PP
341	PG	PG	PP	PM
342	PG	PG	PM	PG
343	PG	PG	PG	PG

8. REFERENCIAS

8. REFERENCIAS

- [1] LIAO, W.H.; WANG, D.H. "Semiactive vibration control of train suspension systems via magnetorheological dampers". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2003, vol. 14, núm. 3, p. 161-172
- [2] ÁLVAREZ MÁNTARAS, Daniel; LUQUE RODRÍGUEZ, Pablo. *Ingeniería e infraestructura de los transportes. Ferrocarriles*. Universidad de Oviedo, 2003.
- [3] PASTOR PAZ, Daniel. *Estudio de la influencia de la determinación del gálibo cinemático ferroviario*. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, 2004.
- [4] MELIS MAYNAR, Manuel; GONZÁLEZ FERNÁNDEZ Francisco Javier. *Ferrocarriles metropolitanos. Tranvías, metros ligeros y metros convencionales*. Col. Ing. Caminos, Canales Y Puertos, 2004.
- [5] ALBERDI URBIETA, Juan. *Manuales de Automoción: Amortiguadores y suspensión*. Disponible en web: http://www.tecnun.es/automocion/files/ebooks/Amortiguadores_y_suspension.pdf. [Consulta: Abril 2010].
- [6] VERA, C. *Ferrocarriles*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. 2006
- [7] DAPICA, Juan Diego. *Simulación de un sistema de suspensión semiactiva en un vehículo ferroviario controlado por lógica Fuzzy*. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [8] CAF. *Jornada sobre suspensiones activas en vehículos ferroviarios*. 1995
- [9] SOTO, Jesús. *Inteligencia artificial e ingeniería del conocimiento*. Facultad de Informática de la Universidad Pontificia de Salamanca, 2008.
- [10] MELIS MAYNAR, Manuel. *Apuntes de Introducción a la dinámica vertical de la vía y a las señales digitales en ferrocarriles*. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008.
- [11] OUELAA, Nourdine; REZAIGUIA, Abdelouahab; LAULAGNET, Bernard. "Vibro-acoustic modelling of a railway bridge crossed by a train". *Applied acoustics*. 2005, vol. 67, núm 5, p. 461-475.